

MESTRADO
MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO
ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
PROJETO

METAHEURÍSTICA GRASP PARA A OTIMIZAÇÃO DE
PERCURSOS DE FISCALIZAÇÃO DE ESTACIONAMENTO

INÊS HEITOR DE MATOS CORREIA GONÇALVES

NOVEMBRO - 2020

MESTRADO EM
MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO
ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
PROJETO

METAHEURÍSTICA GRASP PARA A OTIMIZAÇÃO DE
PERCURSOS DE FISCALIZAÇÃO DE ESTACIONAMENTO

INÊS HEITOR DE MATOS CORREIA GONÇALVES

ORIENTAÇÃO:

PROFESSORA DOUTORA MARIA CÂNDIDA VERGUEIRO MONTEIRO CIDADE MOURÃO
PROFESSORA DOUTORA MARIA MARGARIDA DE OLIVEIRA MOZ CARRAPA

NOVEMBRO - 2020

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, queria agradecer às minhas orientadoras Professora Doutora Maria Cândida Mourão e Professora Doutora Margarida Moz. Considero que tive uma orientação exemplar e à qual não poderia pedir mais. Demonstraram uma imensa prontidão em ajudar e procuraram sempre uma constante melhoria do trabalho desenvolvido, transmitindo o seu conhecimento, crucial para a elaboração do trabalho.

Gostaria também de agradecer a todos os professores que fizeram parte do meu percurso académico, na licenciatura de Economia e no mestrado de Métodos Quantitativos para a Decisão Económica e Empresarial, no Instituto Superior de Economia e Gestão. Toda a aprendizagem, ao longo desse período, foi importante para o desenvolvimento da minha pessoa e consequentemente, para a realização deste trabalho final de mestrado.

Agradeço à minha família por ter estado sempre disponível e me ter ajudado nesta caminhada. Em especial aos meus pais que desde sempre colocaram a minha educação e do meu irmão acima de tudo, procuraram transmitir os bons valores e não houve um dia em que não apoiassem as nossas decisões. Ainda, um agradecimento especial à minha prima Andreia que desempenhou um papel fundamental para o sucesso deste trabalho.

Um último agradecimento aos meus amigos, por fazerem parte desta desafiante etapa da minha vida, por torcerem pelo sucesso da mesma, tanto como eu, e por poder contar com eles sempre que preciso.

RESUMO

A fiscalização de estacionamento na cidade de Lisboa encontra-se a cargo da Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa, E.M. S.A. (EMEL), através dos Agentes de Fiscalização de Estacionamento (AFE). A fiscalização desempenha um papel fundamental na ordenação do estacionamento e assim no bem-estar diário dos residentes e visitantes da cidade. Como tal, é essencial que seja efetuada de forma eficaz e eficiente. Por conseguinte, o presente estudo tem como objetivo a otimização de percursos de fiscalização da empresa EMEL.

Foi desenvolvida uma metaheurística, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), constituída por duas fases em cada iteração: 1) a fase construtiva onde se obtém uma solução admissível inicial, baseada numa heurística construtiva *greedy* aleatorizada; 2) a fase melhorativa em que se procura melhorar a solução obtida através de pesquisa local numa vizinhança. Esta é baseada em duas heurísticas melhorativas, HM1 e HM2.

Foram analisados percursos de dois AFE em dois turnos. A determinação destes foi efetuada sob o princípio da maximização da criticidade total, definida como a medida que permite espelhar a necessidade de fiscalização de cada rua em cada hora.

A metaheurística foi desenvolvida em *Visual Basic for Applications*. Na experiência computacional realizada, na primeira fase da GRASP, testaram-se valores diferentes do parâmetro da heurística construtiva e, para cada uma das soluções admissíveis, foram obtidos resultados para a criticidade total, o tempo de execução computacional e o tempo de fiscalização.

Aplicada HM1 às soluções admissíveis iniciais verificou-se ausência de melhoria da criticidade total. Relativamente a HM2, demonstrou ser bastante eficaz, melhorando a criticidade total em mais de 90% das soluções admissíveis iniciais.

Assim, é recomendada a determinação de percursos de fiscalização através da metaheurística GRASP, com a aplicação da heurística HM2 na fase melhorativa.

Palavras-Chave: Otimização, Metaheurística, Rotas, Criticidade, Problema de Percursos de Fiscalização de Estacionamento

ABSTRACT

Lisbon's parking enforcement is operated by Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa, E.M. S.A. (EMEL), through parking enforcement agents (PEA). Enforcement plays a central role in parking ordination and thus in residents and city visitors' daily well-being. It is thus essential to have an efficient and effective enforcement. Therefore, this study objective was to optimize EMEL enforcement routes.

A Metaheuristic Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) was developed with two phases in each iteration: 1) construction phase based on a greedy randomised constructive heuristic yielding an initial feasible solution; 2) improvement phase, whereby an improvement in the initial solution is attempted, through a local search in the neighbourhood. The second phase is based on two improvement heuristics, HM1 and HM2.

Routes of two PEA with two shifts each were analysed. Routes were determined according to the maximization of the total criticality, defined as the measure that reflects the need of enforcement in each street at each hour.

Metaheuristic was implemented in Visual Basic for Applications. In the computational experience conducted, in GRASP first phase, a range of values of the constructive heuristic parameter were considered and, for each feasible solution, total criticality, computational execution time and enforcement time results were obtained.

No improvement of total criticality was observed following application of HM1 to the initial feasible solutions. Concerning HM2, it proved to be quite competent, improving more than 90% of the initial feasible solution's total criticality.

Thus, the determination of enforcement routes through GRASP metaheuristic is recommended, following application of HM2 heuristic in the improvement phase.

Key-Words: Optimization, Metaheuristic, Routes, Criticality, Parking Enforcement Routes Problem

ÍNDICE

Agradecimentos.....	I
Resumo	II
Abstract	III
Índice	IV
Índice de Figuras.....	VI
Índice de Tabelas	VI
Glossário	VII
1. Introdução	1
2. Problema a Estudar	4
2.1. Definição do Problema	4
2.2. Medida da Necessidade de Fiscalização	5
2.3. Restrições do Problema	7
3. Revisão da Literatura	10
4. Metodologia	14
4.1. Metaheurística	14
4.1.1. Heurística Construtiva Greedy Aleatorizada	14
4.1.2. Heurísticas Melhorativas.....	18
4.2. Programa em VBA.....	21
5. Experiência Computacional	23
5.1. Introdução.....	23
5.2. Análise de Resultados	24
5.3. Soluções Admissíveis Geradas	28
6. Conclusão.....	30
7. Referências Bibliográficas.....	32
ANEXOS.....	34
Anexo A. Representação Zona 022 – Avenida João XXI.....	34
Anexo B. Notação para os Pseudocódigos da Heurística Construtiva Greedy Aleatorizada e das Melhorativas	35
Anexo C. Pseudocódigo da Heurística Construtiva Greedy Aleatorizada.....	38
Anexo D. Pseudocódigo da Heurística Melhorativa (HM1)	42
Anexo E. Pseudocódigo da Heurística Melhorativa (HM2).....	43
Anexo F. Redes das Subzonas Z_1 , Z_2 e Z_4 da Zona 022 – Av. João XXI.....	44

Anexo G. Resultados por Subzona e α em cada Iteração	47
Anexo H. Soluções Admissíveis para Z_1 Obtidas com HCGA com $\alpha = 0,5$ e HM2	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Horário de exploração e dois horários de trabalho	4
Figura 2 – Ruas de Tipo 1 com sentido único (a); duplo sentido (b) e arcos correspondentes (c)	8
Figura 3 – Ruas de Tipo 2 (a) e correspondentes segmentos (b)	8
Figura 4 – Ruas de Tipo 3 (a) e correspondentes segmentos (b)	9
Figura 5 – Ruas de Tipo 4 (a) e correspondentes segmentos (b)	9
Figura 6 – Pseudocódigo do procedimento global da GRASP	14
Figura 7 – Rede exemplificativa.....	16
Figura 8 – Percurso inicial (a) e percursos vizinhos gerados com V_1 (b) e \bar{V} (c)	18
Figura 9 – Menu para a determinação de percursos de fiscalização (a) e página do menu para inserção de dados (b)	22

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I: Criticidade, tempo de fiscalização por aresta em cada hora e tempo de deslocação por aresta.....	16
Tabela II: Aplicação do pseudocódigo ao exemplo	17
Tabela III: Resultados da heurística HCGA, HM1 e HM2	27

GLOSSÁRIO

AFE – Agente de Fiscalização de Estacionamento

ARPP – *Arc Routing Problems with Profits*

CARP – *Capacitated Arc Routing Problem*

CARPP – *Capacitated Arc Routing Problem with Profits*

CML – Câmara Municipal de Lisboa

EMEL – Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa, E.M. S.A.

GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

HCGA – Heurística Construtiva *Greedy* Aleatorizada

HM1 – Heurística Melhorativa 1

HM2 – Heurística Melhorativa 2

LRC – Lista Restrita de Candidatos

PATP – *Profitable Arc Tour Problem*

PPFE – Problema de Percursos de Fiscalização de Estacionamento

SA – Solução Admissível

TFM – Trabalho Final de Mestrado

TOARP – *Team Orienteering Arc Routing Problem*

V1 – Primeira Vizinhança

\bar{V} – Segunda Vizinhança

VBA – *Visual Basic for Applications*

ZAAC – Zona de Acesso Automóvel Condicionado

ZEDL – Zona de Estacionamento de Duração Limitada

1. INTRODUÇÃO

A Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa, E.M. S.A. (EMEL), sob a tutela da Câmara Municipal de Lisboa (CML), tem como missão “a gestão da mobilidade e do estacionamento em Lisboa, através da gestão e fiscalização de lugares na via pública, de parques e de Bairros Históricos” (EMEL, 2020a). Esta missão engloba um vasto leque de atividades, sendo a fiscalização de estacionamento a de maior visibilidade. Contudo, é importante destacar outras ações que contribuem para o aumento da mobilidade, acessibilidade e da sustentabilidade ambiental. A título exemplificativo, o projeto “Bicicletas Partilhadas Gira” veio trazer à cidade um novo significado de mobilidade com a disponibilização de uma rede de bicicletas partilhadas. Esta iniciativa, amiga do ambiente, tem vindo a ganhar um crescente número de adeptos. À responsabilidade da EMEL está também confiada a construção de ciclovias, que promove a utilização da bicicleta como meio de transporte na área de Lisboa, e a construção de parques dissuasores, em zonas periféricas e próximas de transportes públicos, permitindo a diminuição do tráfego no centro da cidade. A implementação de meios mecânicos, como é o caso do Elevador da Sé ou das Escadinhas da Saúde, é também fundamental uma vez que facilita o acesso pedonal (EMEL, 2018).

À data da elaboração do Plano de Atividades e Orçamento 2019 da EMEL, Lisboa encontrava-se em elevado nível de expansão do estacionamento ordenado na via pública, com a expectativa de a mesma estar concluída no ano de 2022. Mais concretamente, no programa de expansão estipulou-se que em 2019 e 2020 o aumento do número de lugares para automóveis seria de 20 000 por ano e em 2021 e 2022 de 10 000 em cada um dos anos (EMEL, 2018).

Além da expansão de estacionamento ordenado, encontram-se previstas outras medidas, nomeadamente, o prolongamento da inspeção em zonas comerciais e com atividade noturna (até às 02h00) e a fiscalização em eventos desportivos e culturais com a cooperação de outros organismos da CML, como a Polícia Municipal. A primeira medida procura acautelar situações em que exista uma elevada procura de estacionamento por parte de residentes e visitantes de Lisboa e, a segunda, evitar congestionamentos e permitir uma boa relação entre os peões e os veículos (EMEL,

2018). O aumento previsível da oferta de estacionamento (em zonas já sob vigilância da EMEL ou novas zonas) e o alargamento do período e áreas de fiscalização vem desafiar, ainda mais, a gestão da fiscalização e a própria fiscalização. Esta não só terá de ser alargada em termos geográficos como temporais.

Considerando os desafios ao nível da fiscalização, a EMEL planeou várias adaptações ao processo de fiscalização. Em particular, durante os quatros anos, irá diminuir o número de lugares de estacionamento fiscalizados por Agente de Fiscalização de Estacionamento (AFE) apeados, reforçar o número de meios de transporte motorizados ao serviço do efetivo de fiscalização (incluindo os AFE), desenvolver novas soluções tecnológicas, renovar totalmente a frota das equipas de bloqueio de viaturas e, por fim, aumentar o número de reboques. O aumento dos meios de transporte motorizados irá permitir: i) uma fiscalização mais eficiente das bolsas de cargas e descargas (abolindo a ocupação das mesmas por veículos indevidos); ii) uma maior eficácia no acompanhamento das infrações referentes ao estacionamento em lugares reservados a pessoas com mobilidade reduzida, passadeiras, segunda fila e faixas BUS e iii) o auxílio na fiscalização noturna, uma vez que esta não será efetuada apeada. Enquanto novas tecnologias facilitarão a verificação da validade do dístico de residente através de um identificador de matrícula, a aquisição de novos reboques permitirá uma maior rapidez na remoção dos veículos bloqueados (EMEL, 2018).

Existe o estigma, por parte do cidadão português, de que a atividade da EMEL é única e exclusivamente o controlo do estacionamento e a penalização do mesmo, caso exista violação de alguma norma estabelecida no Regulamento Geral de Estacionamento e Paragem na Via Pública, no Código da Estrada ou na demais legislação aplicável (Câmara Municipal de Lisboa (CML), 2016). Efetivamente, há uns anos atrás a atividade da empresa era praticamente direcionada para tal, no entanto, a EMEL tem procurado desmistificar essa ideia (EMEL, 2018). Neste momento, em todas as suas ações, procura promover o bem-estar, a qualidade de vida e a segurança dos residentes e visitantes. Assim, a fiscalização de estacionamento é muito mais do que a cobrança de uma quantia simbólica, destacando-se: a garantia de que os lugares de estacionamento reservados para pessoas condicionadas na sua mobilidade são utilizados apenas pelas pessoas para as quais estão direcionados, promovendo a equidade social (CML, 2016); a identificação

de infrações que prejudicam a mobilidade urbana, como o estacionamento em passeadeiras ou na faixa BUS; a garantia do respeito pelas regras; a eficiência nas operações de cargas e descargas; a segurança dos moradores, visitantes e comerciantes locais das Zonas de Acesso Automóvel Condicionado (ZAAC) (CML, 2016); e a requalificação urbana dos bairros históricos (EMEL, 2020c). Todavia, é importante referir que este tipo de ação não é lucrativa para a empresa, caracterizando-se por elevados custos e baixas receitas. No entanto, não se pode ter em conta somente o lado monetário, há que olhar também para o social e perceber a importância do trabalho desenvolvido pela EMEL (EMEL, 2020b).

Em suma, a fiscalização realizada pelos AFE é indispensável para o dia-a-dia das pessoas que circulam em Lisboa. O ideal seria uma constante inspeção de toda a área sob a vigilância da EMEL o que, no entanto, é impraticável. Em alternativa, é crucial que esta seja realizada eficiente e eficazmente, de modo a assegurar que as normas são respeitadas e se evite um grande número de infrações (EMEL, 2020b). Assim, a otimização dos percursos de fiscalização assume um papel importante para alcançar esse objetivo.

O presente Trabalho Final de Mestrado (TFM) aborda o problema de otimização de percursos de fiscalização de estacionamento (PPFE) através de uma metaheurística, com a implementação em *Visual Basic for Applications* (VBA). O estudo do PPFE teve início no âmbito de uma Bolsa de Investigação da instituição de I&D: Centro de Matemática, Aplicações Fundamentais e Investigação Operacional (CMAFcIO), UID/MAT/04561/2019 e que, após o seu desenvolvimento, deu origem ao presente TFM. Este enquadra-se no âmbito do mestrado e surge no seguimento do trabalho desenvolvido por Ferreira (2016) que propôs uma heurística construtiva e duas melhorativas para a sua resolução.

O TFM encontra-se dividido em seis capítulos. No capítulo 2, apresenta-se o problema em estudo, seu objetivo e restrições associadas. No capítulo 3, são revistos os métodos para dar resposta ao problema em análise. No capítulo 4, é abordada a metodologia adotada, incluindo o programa em VBA desenvolvido. No capítulo 5, são apresentados e analisados os resultados obtidos. Finalmente, no capítulo 6, são mencionadas as principais conclusões aferidas, possíveis investigações futuras e melhorias a adotar.

2. PROBLEMA A ESTUDAR

2.1. Definição do Problema

Com o presente estudo pretende-se determinar percursos diários para Agentes de Fiscalização de Estacionamento (AFE), numa zona de Lisboa, problema denominado PPFE. Dado que existem dois turnos por dia torna-se necessário obter dois percursos por AFE.

Cada agente trabalha sete horas por dia adicionando-se uma hora para o almoço. Contudo, o horário de exploração é de dez horas, decorrendo das 9h00 às 19h00. Assim, para que este último seja totalmente coberto é necessário distinguir dois horários de trabalho. No primeiro horário a fiscalização é feita das 9h00-13h00 no turno da manhã e das 14h00-17h00 no turno da tarde e no segundo caso das 11h00-14h00 e das 15h00-19h00, respetivamente (Figura 1).

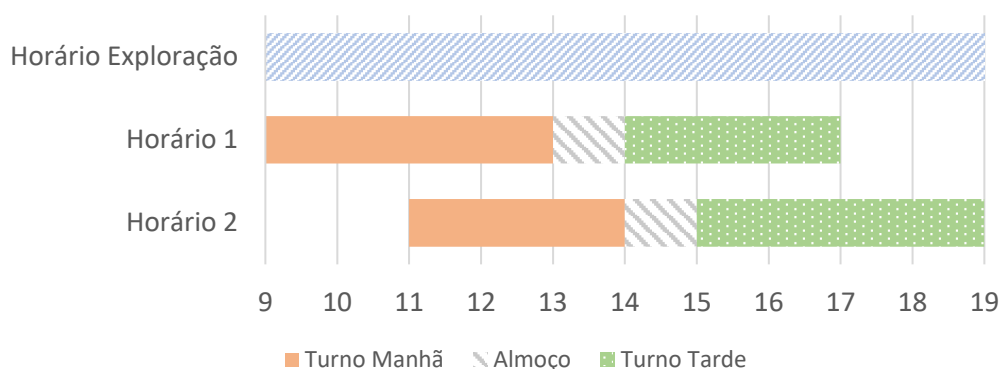


Figura 1 – Horário de exploração e dois horários de trabalho (fonte: Ferreira, 2016)

A área de fiscalização na cidade de Lisboa encontra-se dividida em Coroas e Eixos Tarifados, que, por sua vez, são constituídos por Zonas de Estacionamento de Duração Limitada (ZEDL) e arruamentos específicos dessas zonas. As Coroas e Eixos Tarifados dividem-se em três tipos, em que se aplica a mesma tarifa e duração máxima de estacionamento – eixos tarifados vermelhos que correspondem a eixos com elevada rotação e coroas amarela e verde que correspondem a áreas de média e baixa rotação, respetivamente (CML, 2016). Por outro lado, as ZEDL são zonas com regras específicas de horário de estacionamento, sendo um total de 62 (CML, 2016). Além das ZEDL, na cidade de Lisboa, existem Zonas de Acesso Automóvel Condicionado (ZAAC) com

condições especiais de acesso e estacionamento (CML, 2016). Estas correspondem a bairros históricos e foram criadas com o intuito da requalificação urbana dos bairros e da máxima segurança dos seus residentes e visitantes (EMEL, 2020c). No presente trabalho, a determinação de percursos de fiscalização será circunscrita apenas a uma das 62 ZEDL existentes. Cada ZEDL é representada por um conjunto de ruas que se subdividem em troços (daqui em diante apelidados por ligações). Adicionalmente, estes dividem-se em dois tipos: segmentos, onde é feita a travessia com fiscalização, e conetores, que permitem a deslocação entre segmentos e a travessia sem fiscalização. Os segmentos também podem ser usados como conetores.

A Zona 022 – Avenida João XXI foi a escolhida para a determinação de percursos. Esta encontra-se inserida na coroa amarela e a sua representação pode ser consultada na Figura A. 1.

2.2. Medida da Necessidade de Fiscalização

A procura de estacionamento na área de Lisboa não é constante quer em termos temporais, quer em termos geográficos. Para qualquer segmento a procura varia ao longo das dez horas de exploração e para cada uma dessas horas é diferente entre segmentos. Desta forma, Ferreira (2016) criou um índice que espelha a necessidade de fiscalização de cada segmento. Esse índice, com a designação de criticidade, é definido por segmento e por hora. O seu cálculo, efetuado para um dia com os dados do dia anterior, tem em conta características com efeito direto na necessidade de fiscalização enumeradas de seguida, com uma pequena descrição de como estas influenciam a fiscalização (Ferreira, 2016).

- i. **Procura de Estacionamento** – quanto maior for o número de veículos estacionados num segmento a determinada hora, maior é a probabilidade de ocorrência de infrações e, assim, maior a necessidade de fiscalização e, consequentemente, a sua criticidade a essa hora;
- ii. **Eixos e Coroas Tarifadas** – os eixos e as coroas tarifadas influenciam a criticidade na medida em que a oferta de lugares de estacionamento não é igual à sua procura. Nos eixos vermelhos, onde se verifica uma alta rotação, é de esperar que a oferta seja menor que a procura e que haja uma necessidade de inspeção

superior comparativamente a ligações pertencentes às coroas amarelas ou verdes.

O mesmo acontece se comparadas as coroas amarelas com a verdes;

- iii. **Infrações** – quando um AFE localiza um veículo em infração, tem de emitir uma denúncia fazendo referência ao segmento, à hora e à gravidade da infração. Desta forma, quanto maior o número de infrações num dado segmento e hora, maior a probabilidade de aí voltar a existir uma transgressão. Logo, impõe-se uma fiscalização mais apertada nesses segmentos. De igual forma, os segmentos em que se registam incumprimentos de maior gravidade numa determinada hora requerem uma fiscalização mais apertada;
- iv. **Última fiscalização** – o tempo decorrido desde a última fiscalização também representa um fator relevante para o cálculo da criticidade. Por cada dia que passa sem existir fiscalização num segmento há um aumento dessa necessidade. Assim, os segmentos em que o tempo decorrido desde a última fiscalização é superior ao de outros segmentos, na mesma hora, têm prioridade na inspeção pelos AFE;
- v. **Dístico** – a EMEL possibilita que os residentes na área de Lisboa requeiram um dístico, o dístico de residente. No caso de este ser apenas para uma única viatura é gratuito, contudo, se o número de viaturas for dois ou mesmo três passa a ser pago um valor anual (CML, 2016). Este dístico permite ao proprietário estacionar na ZEDL ou na ZAAC correspondente e por tempo indeterminado (CML, 2016). Esta especificidade faz com que a necessidade de fiscalização de um determinado segmento, numa dada hora, seja inversamente proporcional ao número de dísticos emitidos para a zona a que o mesmo diz respeito.

Em suma, a criticidade é a medida que avalia a qualidade das soluções admissíveis (SA), ou seja, quanto maior for o seu valor melhor é a SA. Assim, o problema em estudo tem como objetivo a maximização da criticidade total, calculada através da soma da criticidade de cada percurso de cada AFE. No entanto, não só é fundamental ter uma SA cujo valor seja elevado, mas também com uma percentagem elevada do número de troços com fiscalização.

O problema em estudo, PPFE, define-se numa rede orientada $G = (V, A)$, onde V representa o conjunto de vértices e A o conjunto de arcos. Caso um arco esteja entre os que necessitam de fiscalização este é considerado segmento e, caso contrário, um

conetor. Cada percurso inicia-se e finaliza-se num vértice, designado de ponto base, do subconjunto $V' \subseteq V$, como se explica de seguida. Para cada arco $(i, j) \in A$ existe um tempo de deslocação associado e para cada arco fiscalizável (segmento) define-se, adicionalmente, um tempo de fiscalização e criticidade, que variam de acordo com a hora.

2.3. Restrições do Problema

O problema em estudo apresenta restrições que condicionam a construção dos percursos. Como tal, aquando da determinação de dois percursos para cada AFE, maximizando a criticidade total, há que ter em conta a informação que se encontra de seguida.

- i. **Pontos Base** – cada AFE inicia o seu percurso deslocando-se para um local na zona em que tem de efetuar a fiscalização e que seja próximo de estações de transportes públicos, ou seja, um ponto base. No fim de cada percurso, o agente regressa novamente a um ponto base (igual ou diferente do inicial).
- ii. **Turnos** – diariamente, cada AFE trabalha em dois turnos distintos: um turno antes da hora do almoço e outro após a mesma. É, pois, necessário obter, como *output*, dois percursos para cada AFE, um para cada turno.
- iii. **Tempos** – a duração do percurso de cada trabalhador é obtida através da soma dos tempos de deslocação e fiscalização. Tendo em conta que a cada turno está associado um número de horas, essa duração não pode exceder a do turno do AFE.
- iv. **Fiscalização** – uma ligação não pode ser fiscalizada em horas consecutivas nem mais de uma vez na mesma hora, o que permite dar prioridade aos segmentos ainda não inspecionados.
- v. **Tipo de Ligações** – a área de Lisboa é constituída por ruas com estacionamento de tipo diverso. Tal particularidade faz com que exista a necessidade de distinguir quatro tipos de rua (Ferreira, 2016), representadas por arcos da rede, como se mostra de seguida.

Tipo 1 – ruas caracterizadas por sentido único ou duplo, com estacionamento apenas num lado da via e fiscalização realizada no sentido do tráfego (Figura 2 (a) e (b)). A Figura 2 (c) permite esquematizar as ligações correspondentes a

este tipo. Neste caso, (i, j) pode ser utilizado como segmento ou conector e (j, i) apenas como conector.

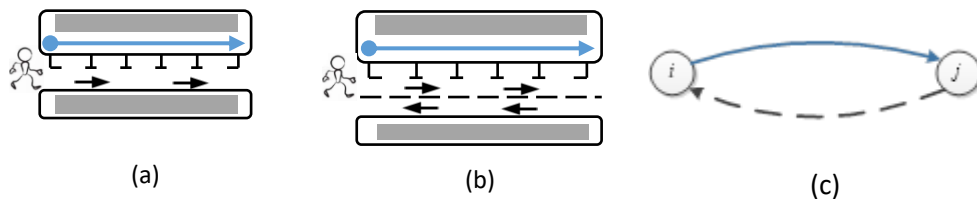


Figura 2 – Ruas de Tipo 1 com sentido único (a); duplo sentido (b) e arcos correspondentes (c) (baseado em Ferreira, 2016)

Tipo 2 – ruas caracterizadas por duplo sentido, estacionamento em ambos os lados da via e fiscalização realizada no sentido do tráfego. Todavia, inspecionar um dos lados não implica a inspeção sucessiva do outro. A Figura 3 (a) ilustra a fiscalização de ruas deste tipo, enquanto em (b) se representam os segmentos correspondentes (j, i) e (i, j) .

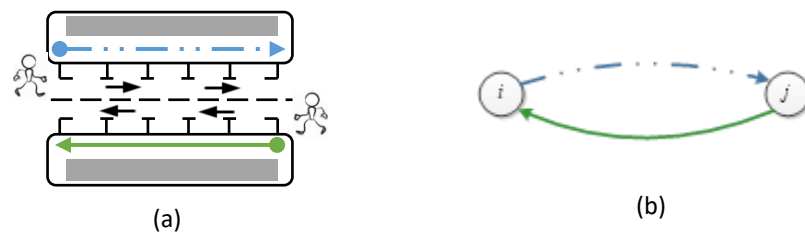


Figura 3 – Ruas de Tipo 2 (a) e correspondentes segmentos (b) (baseado em Ferreira, 2016)

Tipo 3 – ruas caracterizadas por duplo sentido e estacionamento nos dois lados da via e na placa central. Como é possível verificar na Figura 4 (a), existem duas opções para fiscalizar o estacionamento deste tipo de ruas, iniciando à esquerda ou à direita. A fiscalização com início à esquerda é representada pelo arco (i, j) (Figura 4 (b)) que corresponde ao percurso $((i, j), (j, i) \text{ e } (i, j))$. Por sua vez, se começar à direita, efetua o percurso $((j, i), (i, j) \text{ e } (j, i))$ representado pelo arco (j, i) (Figura 4 (b)). É importante referir que a fiscalização é feita apenas com início em um dos lados.

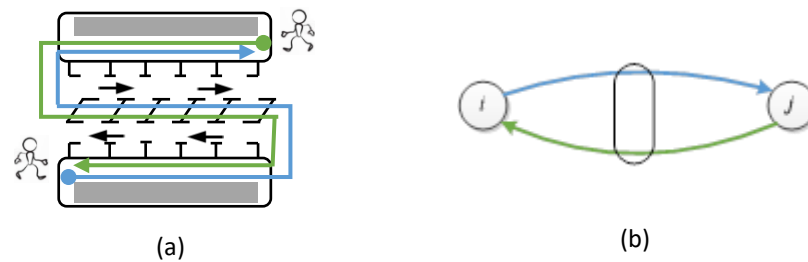


Figura 4 – Ruas de Tipo 3 (a) e correspondentes segmentos (b) (baseado em Ferreira, 2016)

Tipo 4 – ruas caracterizadas por sentido único e estacionamento em ambos os lados da via. Na Figura 5 (a) ilustram-se as duas possíveis opções para a fiscalização de ruas deste tipo. A primeira, com início e fim à esquerda corresponde a $((i, j), (j, i))$, e a segunda, com início e fim à direita, corresponde a $((j, i), (i, j))$. A fiscalização é feita considerando apenas uma das opções. Na Figura 5 (b) o percurso à esquerda tem início e fim em i e o à direita em j .

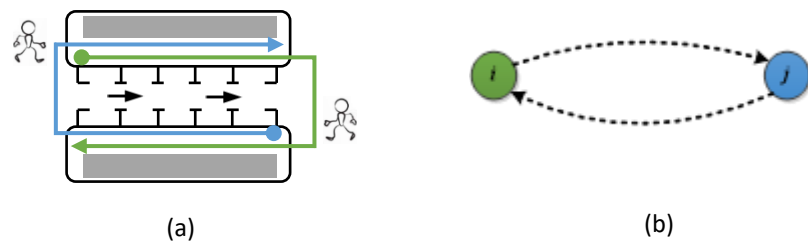


Figura 5 – Ruas de Tipo 4 (a) e correspondentes segmentos (b) (baseado em Ferreira, 2016)

Em resumo, o problema consiste na determinação de percursos para todos os agentes em todos os turnos diários, respeitando as restrições apresentadas e maximizando a função que representa a criticidade total. Note-se que uma SA inclui dois percursos para cada AFE, compatíveis com a duração dos turnos respetivos.

3. REVISÃO DA LITERATURA

O Problema em estudo, otimização de Percursos de Fiscalização de Estacionamento (PPFE), pode ser considerado um *Arc Routing Problem* – roteamento nos arcos. Estes podem subdividir-se em diferentes categorias, entre os quais surge o *Capacitated Arc Routing Problem* (CARP) e o *Arc Routing Problem with Profits* (ARPP), como se ilustra de seguida.

O CARP inclui problemas em que se procura servir um determinado conjunto de arcos (tarefas) com recurso a múltiplos veículos e em que o percurso começa e acaba no mesmo vértice. Para todos os arcos existe um custo de viagem associado e para cada tarefa uma procura. Um CARP define-se como um problema de minimização do custo total dos percursos definidos para servir as tarefas, em que a capacidade de cada veículo não pode ser excedida (Corberán et al., 2014).

Os ARPP caracterizam-se por serem problemas em que apenas um subconjunto de tarefas são servidas, existe um benefício associado a cada tarefa e se procura um de três objetivos: i) maximizar o benefício total recolhido; ii) maximizar a diferença entre o benefício total recolhido e o custo total de viagem; iii) minimizar o custo total de viagem, respeitando um benefício mínimo.

A determinação de percursos de fiscalização de estacionamento é realizada para dois ou mais AFE, ou seja, múltiplos veículos, podendo considerar-se relacionado com os seguintes ARPPs: *Profitable Arc Tour Problem* (PATP), *Team Orienteering Arc Routing Problem* (TOARP) e *Capacitated Arc Routing Problem with Profits* (CARPP) (Corberán et al., 2014).

O PATP procura maximizar a diferença entre o benefício total recolhido e o custo total de viagem, respeitando o tempo máximo disponível. A cada arco estão associados três valores – o benefício (podendo ser nulo), o tempo de viagem e o custo da mesma. O vértice inicial e final do percurso podem não coincidir. O TOARP é um problema de maximização do benefício total recolhido, em que, para além da restrição do tempo máximo disponível se impõe obrigatoriamente o serviço de um subconjunto de tarefas. Existe um vértice denominado depósito que define o vértice inicial e final do percurso. Por fim, o CARPP distingue-se dos dois tipos de problemas descritos anteriormente, uma

vez que engloba a componente da capacidade. A cada arco com benefício diferente de zero está associado um valor não negativo da procura. Assim, este problema procura maximizar o benefício total recolhido respeitando a capacidade de cada veículo e o tempo máximo disponível para as diferentes rotas do mesmo veículo. Tal como no TOARP, existe um vértice depósito para início e fim dos percursos (Corberán et al., 2014).

Comparando as características do PPFE com as de um CARP e de um ARPP observa-se uma maior semelhança com o segundo tipo, uma vez que existe um benefício associado a cada arco, criticidade. Relativamente aos subtipos do ARPP referidos, o PPFE partilha com o TOARP e o CARPP o objetivo e com o PATP a restrição de tempo e o facto do vértice inicial e final do percurso poderem não coincidir.

O PPFE é um problema complexo pelo que é adequada a adoção de um método de resolução não exato, como é o caso de uma metaheurística (Talbi, 2009). De seguida referem-se metaheurísticas estudadas e que motivaram a opção neste trabalho.

Usberti et al. (2013) abordam uma metaheurística GRASP com *evolutionary path-relinking* para o CARP. A aplicação da metodologia inicia com a metaheurística GRASP que se caracteriza, em cada iteração, por apresentar duas fases. Na fase construtiva é obtida uma solução inicial e na fase melhorativa, através de pesquisa local, procura-se melhorar a solução previamente gerada. A fase construtiva recorre à heurística *path-scanning* com *ellipse rule*, envolvendo adaptações no processo de seleção de cada arco. Neste processo os autores selecionam aleatoriamente os arcos a partir de uma lista restrita de candidatos (LRC) que definem. Na LRC são incluídos todos os arcos que satisfaçam uma certa condição, podendo a seleção variar entre *greedy* pura ou aleatória pura. Adicionalmente, a regra da elipse, proposta por Santos et al. (citado em Usberti et al. (2013)) é utilizada caso a capacidade remanescente do veículo seja inferior ou igual a um certo valor relacionado com a procura que falta servir. Esta regra assenta no princípio de que veículos cuja capacidade disponível é reduzida devem servir apenas arcos próximos do caminho mais curto entre o último arco da rota e o depósito. Na fase melhorativa, Usberti et al. (2013) recorreram a três tipos de movimentos para obter soluções vizinhas: inserção simples, inserção dupla e troca, podendo, nos três casos, ocorrer ou não inversão. A inserção simples remove um arco da sua posição e coloca-o numa nova, enquanto na inserção dupla a remoção/inserção é realizada para

dois arcos consecutivos. No terceiro tipo de movimento ocorre a troca de posições entre dois arcos. A estratégia de pesquisa numa vizinhança escolhida foi a *best improvement*, ou seja, verifica-se toda a vizinhança e é escolhido o movimento que origina a maior redução do custo da solução. Na pesquisa local, além de obtidas soluções admissíveis com o menor custo, foram aceites soluções não admissíveis em que a capacidade do veículo é violada. Tanto as soluções admissíveis como as não admissíveis foram utilizadas no *path-relinking*. Esta técnica combina características de intensificação e diversificação, ao estudar a ligação de trajetórias entre soluções iniciais de boa qualidade. Por fim, a aplicação da metodologia termina com *evolutionary path-relinking* (estratégia de intensificação) em que se criam novas soluções através da movimentação de blocos de arcos.

Ainda relativamente ao CARP, Lacomme et al. (2001) propõem, pela primeira vez, um algoritmo genético. Este trata o caso da recolha de lixo municipal e caracteriza-se pelas seguintes extensões: rede mista e cruzamentos com viragem proibida. A população é constituída por soluções aleatórias e três soluções obtidas através das heurísticas Ulusoy's, *Path-Scanning* e *Augment-Merge*. A fase de reprodução inicia-se com a escolha de dois progenitores, por torneio binário, dos quais se obtêm dois descendentes mediante *crossover* OX. No entanto, apenas um deles será inserido na população da geração seguinte depois de sofrer mutação.

Cortinhal et al. (2016) procuram resolver um problema do tipo *Sectoring-Arc Routing Problem* através de heurísticas de pesquisa local, mais precisamente *Hill Climbing* e *Tabu Search*. Este tipo de problema considera a necessidade de divisão da área de atuação em sectores de dimensões que facilitem a sua resolução, ou seja, a posterior determinação de um percurso para cada veículo minimizando o tempo total da rota. Quanto à metodologia *Tabu Search* adotada, caracteriza-se por uma pesquisa local em que são aceites soluções de pior qualidade e por apresentar memória de curto prazo. Essa memória deve-se à lista *tabu* que permite guardar informação relativa às soluções e aos movimentos realizados. Em cada iteração a lista é atualizada de forma a impedir ciclos, ou seja, visitar mais do que uma vez a mesma solução (Talbi, 2009). A outra heurística desenvolvida, *Hill Climbing*, assemelha-se à heurística anterior, embora apenas aceite soluções melhores. Cortinhal et al. (2016), de modo a avaliar a qualidade

de cada solução, criaram uma função que se caracteriza pela soma ponderada de três medidas consideradas fundamentais. Para obter soluções admissíveis iniciais, desenvolveram uma heurística construtiva, baseada na técnica *cluster-first/route-second*. A geração de soluções vizinhas é realizada com a movimentação de arcos entre sectores, aplicando movimentos de tipo *swap* e *compound shift*. O primeiro consiste na troca de pares de arcos entre sectores e o segundo na mudança de sector de no máximo três arcos, de forma sequencial.

O problema de otimização de percursos de fiscalização de estacionamento para os agentes da EMEL, tratado no presente TFM, foi objeto de um estudo por Ferreira (2016). O autor propõe uma heurística construtiva para obter SA iniciais e, em seguida, aplica-lhes duas heurísticas melhorativas. Todavia, não se conhece nenhum estudo que procure otimizar percursos de fiscalização através da aplicação de uma metaheurística, como se propõe neste TFM.

4. METODOLOGIA

4.1. Metaheurística

De modo a obter soluções admissíveis para o problema foi selecionada uma metaheurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP). Esta compreende duas fases em cada iteração: uma fase construtiva que se baseia numa heurística construtiva *greedy* aleatorizada (HCGA) para obter uma solução admissível, e uma fase melhorativa, em que se procura melhorar a solução obtida na primeira fase através de pesquisa local numa vizinhança.

Na Figura 6 encontra-se representado o procedimento geral da metaheurística GRASP, que percorre as duas fases enquanto um critério de paragem não é verificado.

Procedimento Global – GRASP	
Input: rede; <i>maxiter</i>	// nº máximo de iterações da GRASP
<i>maxitersem</i>	// nº máximo de iterações de HM1 ou HM2 sem melhorar SA
<i>maxiterHM</i>	// nº máximo de iterações de HM1 ou HM2
<i>iter</i> = 0; <i>iteracao</i> = 0; <i>HMiter</i> = 0; <i>f</i> = 0	
Enquanto (<i>iter</i> ≤ <i>maxiter</i>)	
Call heuristica_construtiva_greedy_aleatorizada	// output SA(HCGA); Criticidade_total
SA = SA(HCGA)	// solução admissível corrente e valor
Enquanto (<i>iteracao</i> ≤ <i>maxitersem</i>) e (<i>HMiter</i> ≤ <i>maxiterHM</i>)	
Call heuristica_melhorativa HM1 ou HM2	// output SA(HM); <i>f</i> (HM)
Se <i>f</i> (HM) > <i>f</i>	
SA = SA(HM); <i>f</i> = <i>f</i> (HM); <i>iteracao</i> = 0; <i>HMiter</i> = <i>HMiter</i> + 1	
Senão	
<i>iteracao</i> = <i>iteracao</i> + 1	
FimSe	
FimEnquanto	
<i>iter</i> = <i>iter</i> + 1	
FimEnquanto	// iter
Output: SA e Criticidade_total	

Figura 6 – Pseudocódigo do procedimento global da GRASP

4.1.1. Heurística Construtiva Greedy Aleatorizada

A heurística construtiva *greedy* aleatorizada (HCGA) tem como objetivo obter uma solução admissível inicial para o problema, ou seja, dois percursos por cada AFE. Na Tabela B. I (Anexo B.), encontra-se a notação utilizada para escrever todos os procedimentos da HCGA em pseudocódigo (Figura C. 1 (Anexo C.)).

A fase construtiva da metaheurística GRASP permite determinar percursos de fiscalização admissíveis para dois turnos de cada AFE. Os percursos têm início e fim num ponto base (igual ou diferente), sendo a escolha do vértice inicial feita de forma aleatória. A seleção de arcos, também aleatória, prioriza a escolha de arcos fiscalizáveis (segmentos) em detrimento dos não fiscalizáveis (conectores). No caso de existir pelo menos um arco fiscalizável na hora h é criada uma lista restrita de candidatos (LRC). A inclusão de cada arco em LRC depende da sua criticidade durante h não ter valor inferior ao de uma constante previamente calculada. O cálculo desta constante depende do valor, entre 0 e 1, de um parâmetro, α . Por outro lado, caso não exista nenhum arco fiscalizável a seleção é realizada a partir de uma lista de conectores. O arco selecionado só é adicionado ao percurso se a soma do tempo total do percurso em construção, com o tempo do arco selecionado e com o tempo do caminho mais curto ao ponto base mais próximo, for igual ou inferior à duração máxima para o percurso do AFE. Se esta condição for satisfeita, o arco é adicionado ao percurso e, caso seja em fiscalização, é estabelecido que não poderá voltar a sê-lo nessa hora nem em nenhuma das duas “adjacentes” (a anterior ou a seguinte). Caso contrário, e caso não seja possível selecionar nenhum novo arco, verifica-se se o segundo vértice do último arco adicionado ao percurso é um ponto base. Em caso afirmativo, o percurso termina. Se o vértice não corresponder a um ponto base é “adicionado” ao percurso o caminho mais curto desse vértice ao ponto base mais próximo, para ser atravessado sem fiscalização.

Na Figura 7 é apresentada uma rede, simples e de pequena dimensão, que pretende ilustrar o pseudocódigo apresentado para a fase construtiva. Considere-se a geração de um percurso de um AFE (AFE 1) para o turno da manhã, em que o agente inicia a fiscalização às 9h00 e o seu percurso tem uma duração máxima de 180 minutos (3 horas). Na Tabela I encontram-se as criticidades, os tempos de fiscalização numa dada hora e os tempos de deslocação das arestas da rede do exemplo. Na Tabela II é possível consultar a aplicação do pseudocódigo da fase construtiva ao exemplo da Figura 7, considerando $TL_k = 180$; $\alpha = 0,2$; e que inicialmente todas as arestas são fiscalizáveis e de tipo 3.

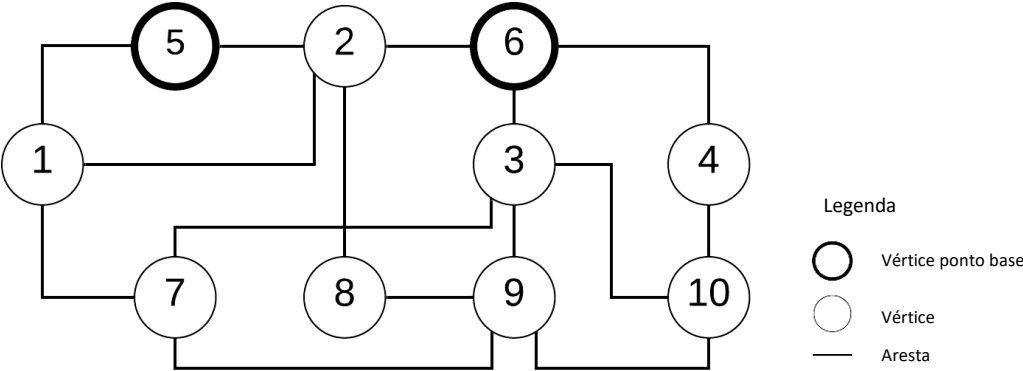


Figura 7 – Rede exemplificativa

Tabela I: Criticidade, tempo de fiscalização por aresta em cada hora e tempo de deslocação por aresta

Aresta	$C_{ijh} (TF_{ijh})$			TD_{ij}
	$h = 9$	$h = 10$	$h = 11$	
(1,2)	180 (14)	240 (14)	300 (14)	8
(1,5)	400 (23)	420 (19)	460 (20)	20
(1,7)	380 (16)	460 (16)	500 (17)	15
(2,5)	360 (20)	420 (24)	420 (21)	12
(2,6)	220 (18)	220 (19)	300 (20)	15
(2,8)	300 (12)	360 (14)	420 (15)	9
(3,6)	480 (60)	540 (61)	600 (63)	30
(3,7)	600 (24)	660 (24)	720 (24)	20
(3,9)	240 (11)	300 (8)	340 (8)	9
(3,10)	300 (25)	420 (25)	425 (25)	15
(4,6)	540 (12)	540 (11)	600 (14)	11
(4,10)	300 (16)	360 (16)	380 (16)	14
(7,9)	360 (15)	480 (17)	540 (25)	20
(8,9)	120 (14)	240 (15)	360 (15)	7
(9,10)	360 (9)	420 (9)	480 (10)	5

Tabela II: Aplicação do pseudocódigo ao exemplo

h	nodo i	δ_{ih}^+	Criticidade	$criterio$	\in LRC?	Aresta de LRC (seleção aleatória)	$fiscalizável$	t_{ijh}	$soma_t$	$t_usado < TL_k?$	Atualização de variáveis	Percurso em construção
9	6	(6,2)	220	220 + 0,2(540 – 220) = 284	x	-	-	-	-	-	Atualizar $fiscalizado_{6\ 3\ h}$ $fiscalizavel_{6\ 3\ h}$ nas respetivas horas h $muda_h = 0 + 90 > 60$ $\Rightarrow muda_h = 30$	((6,3),
		(6,3)	480		✓	(6,3)	True	30 + 60 = 90	0	0 + 90 + 30 = 120 < 180		
		(6,4)	540		✓	-	-	-	-	-		
10	3	(3,7)	660	300 + 0,2(660 – 300) = 372	✓	-	-	-	-	-	Atualizar $fiscalizado_{3\ 10\ h}$ $fiscalizavel_{3\ 10\ h}$ nas respetivas horas h $muda_h = 30 + 40 > 60$ $\Rightarrow muda_h = 10$	((6,3), (3,10),
		(3,9)	300		x	-	-	-	-	-		
		(3,10)	420		✓	(3,10)	True	15 + 25 = 40	90	90 + 40 + 25 < 180		
11	10	(10,4)	380	380 + 0,2(480 – 380) = 400	x	-	-	-	-	-	Atualizar $fiscalizado_{10\ 9\ h}$ $fiscalizavel_{10\ 9\ h}$ nas respetivas horas h $muda_h = 10 + 15 < 60$ $\Rightarrow muda_h = 25$	((6,3), (3,10), (10,9),
		(10,9)	480		✓	(10,9)	True	5 + 10 = 15	130	130 + 15 + 28 < 180		
11	9	(9,3)	340	340 + 0,2(540 – 340) = 380	x	-	-	-	-	-	-	-
		(9,7)	540		✓	(9,7)	True	20 + 25 = 45	145	145 + 45 + 35 > 180	-	-
		(9,8)	360		x	-	-	-	-	-	-	-
11	9	(9,3)	340	340 + 0,2(360 – 340) = 344	x	-	-	-	-	-	-	-
		(9,8)	360		✓	(9,8)	True	7 + 15 = 22	145	145 + 22 + 21 > 180	-	-
11	9	(9,3)	340	-	✓	(9,3)	True	9 + 8 = 17	145	145 + 17 + 30 > 180	-	-
11	9	-	-	-		Arestas cmc_9 $\Rightarrow ((9,8),$ $(8,2),$ $(2,5))$	-	-	-	145 + 28 < 180	$muda_h = 25 + 28 < 60$ $\Rightarrow muda_h = 56$	((6,3), (3,10), (10,9), (9,8), (8,2), (2,5))

Considerando $TL_k = 180$; $\alpha = 0,2$ e que inicialmente todos os segmentos são fiscalizáveis. LRC – Lista Restrita de Candidatos

4.1.2. Heurísticas Melhorativas

Com base na solução admissível gerada na primeira fase da GRASP, a fase melhorativa tem como objetivo obter soluções melhores, ou seja, com valor de criticidade total superior. No entanto, é necessário definir vizinhanças.

Assim, definem-se duas vizinhanças, a primeira vizinhança ($V1$) e a segunda vizinhança (\bar{V}), tendo em conta um percurso de um AFE. $V1$ assenta no princípio de substituir uma ligação por duas novas e \bar{V} na eliminação de um conjunto de ligações e na posterior reconstrução do percurso. Aplicando ao percurso inicial apresentado na Figura 8 (a) a título exemplificativo obtiveram-se dois percursos vizinhos, Figura 8 (b) e (c). No primeiro, $V1$, a ligação (5,6) foi substituída pelas duas novas (5,7) e (7,6). No segundo, \bar{V} , eliminaram-se as ligações (3,4), (4,5), (5,6) e (6,1) e reconstruiu-se o percurso com inclusão das ligações (3,8), (8,9), (9,10), (10,11) e (11,1).

Para a segunda fase da GRASP, criaram-se duas heurísticas melhorativas: a heurística melhorativa 1 (HM1), baseada em $V1$, e a heurística melhorativa 2 (HM2), baseada em \bar{V} . A notação necessária para a escrita em pseudocódigo pode ser consultada na Tabela B. II (Anexo B.). Na Figura D. 1 (Anexo D.) encontra-se o pseudocódigo referente a HM1 e na Figura E. 1 (Anexo E.) o de HM2.

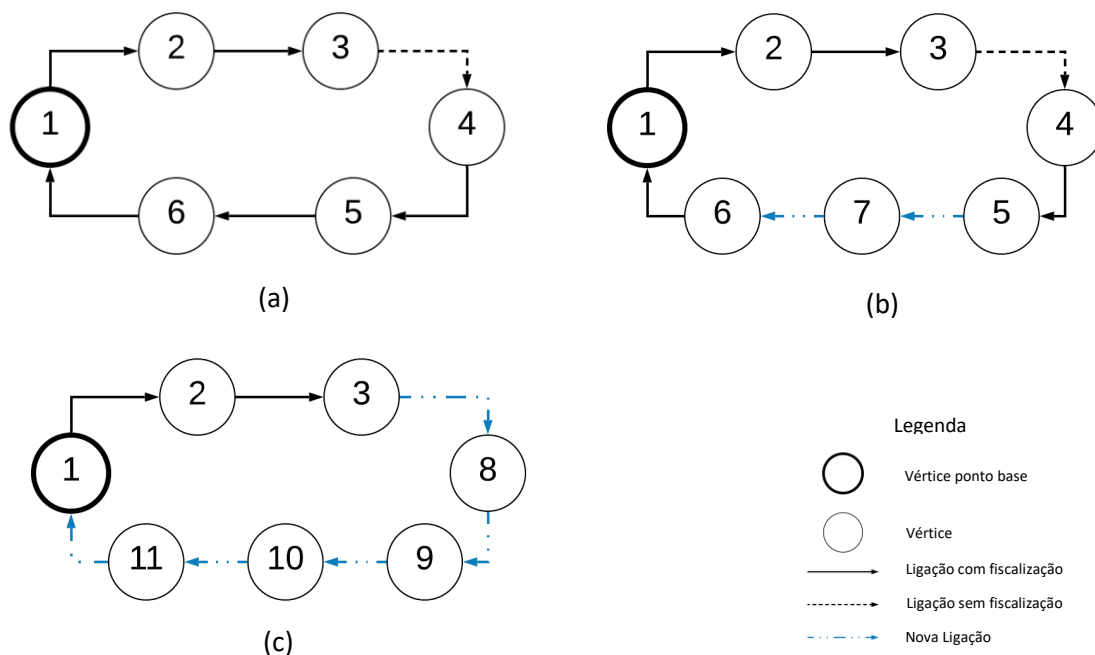


Figura 8 – Percurso inicial (a) e percursos vizinhos gerados com $V1$ (b) e \bar{V} (c)

4.1.2.1. Heurística Melhorativa (HM1)

Como se referiu anteriormente esta heurística tem por base a vizinhança V1, ou seja, procura eliminar uma ligação e inserir duas novas. A ligação eliminada pode ser segmento ou conetor, garantindo-se apenas que uma das inseridas seja segmento. Este procedimento tem incidência na vizinhança V1 restrita, considerando apenas as ligações pertencentes à última hora do turno de fiscalização, de modo a que não seja tão exaustivo. Tendo em conta que existem dois horários de trabalho com dois turnos cada, ter-se-á em consideração a última hora de cada turno de cada AFE: no primeiro horário com início às 12h00 e às 16h00 e no segundo às 13h00 e às 18h00. Para além dessa particularidade, a ligação final (ao ponto base) ou as ligações finais (do caminho mais curto para o ponto base mais próximo) não são testadas para eliminação.

A solução admissível obtida na primeira fase da GRASP, $SA(HCGA)$, é composta por dois percursos por AFE. Como tal, a exploração da vizinhança inicia-se para o percurso correspondente ao primeiro turno do primeiro AFE, seguindo-se o do segundo turno, e repetindo-se a lógica para os restantes AFE. A estratégia de pesquisa na vizinhança de uma solução explora a vizinhança até obter uma solução melhor, passando depois a explorar a vizinhança dessa solução. Se após um número dado de iterações (neste caso, seis) não se obtiver nenhuma solução melhor, a exploração da vizinhança daquela solução termina. Definiu-se, ainda, um número máximo de 21 iterações para a exploração da vizinhança em situações em que é identificada uma nova solução melhor.

Dado um percurso de um turno de um AFE, a aplicação da heurística melhorativa 1 (HM1) define-se da seguinte forma. Para uma dada ligação passível de eliminação é determinado um par de possíveis novos arcos que, podendo substituí-lo, respeitem a duração máxima do turno do AFE. Posteriormente, calcula-se a diferença na criticidade total gerada pela inclusão dos novos arcos. Caso a diferença seja negativa o percurso não sofre alterações e procura-se um novo par de arcos. Caso contrário, seguem-se os seguintes passos: i) o percurso é atualizado, substituindo o arco pelos dois novos; ii) sempre que se substitui um arco verifica-se se as ligações eliminada e inseridas são segmentos; iii) no caso da ligação eliminada ser segmento esta passa a ser fiscalizável, sendo atualizadas as variáveis nas horas consecutivas correspondentes e iv) a solução admissível corrente e o seu valor (criticidade total) são atualizados. O processo de

melhoria da solução corrente só termina quando explorada a vizinhança do último percurso, correspondente ao segundo turno do último AFE.

4.1.2.2. *Heurística Melhorativa (HM2)*

A heurística melhorativa 2 (HM2) recorre à definição de vizinhança \bar{V} , em que, a partir de uma solução inicial, se elimina um conjunto de ligações no percurso de um AFE sendo depois reconstruído esse percurso. A escolha dos arcos a eliminar é realizada a partir de um critério. O primeiro arco do percurso a eliminar tem de ser obrigatoriamente conetor que, no entanto, não pode ser nem a ligação final com o ponto base nem nenhuma das ligações do caminho mais curto para o ponto base mais próximo. Esta última deve-se ao facto de não ser desejável eliminar o caminho mais curto. Quanto à reconstrução, esta é baseada numa técnica diferente da utilizada na fase construtiva do percurso inicial, apesar de também fundamentada na escolha de ligações não fiscalizadas durante uma hora. Assim, para além de se procurar um aumento da criticidade total procura-se uma SA com mais segmentos que conetores.

Considerando a solução admissível inicial, $SA(HCGA)$, obtida na fase construtiva da GRASP e constituída por dois percursos para cada AFE, a exploração da vizinhança de $SA(HCGA)$ inicia-se para o percurso correspondente ao primeiro turno do último AFE. É de esperar que o percurso do último AFE, gerado na fase construtiva, tenha um maior número de conetores relativamente a segmentos, do que um percurso que foi gerado anteriormente a este. Como tal, o processo é iniciado para o primeiro percurso do último AFE. Segue-se o do segundo turno, repetindo-se a lógica para os restantes AFE. A estratégia de pesquisa na vizinhança de uma solução explora a vizinhança até obter uma solução melhor, passando depois a explorar a vizinhança restrita dessa solução. Tal como para HM1, se, ao fim de seis iterações, a criticidade da solução corrente não sofrer qualquer aumento é iniciada a exploração da vizinhança de outra solução. Sempre que a criticidade aumenta esse acontecimento é contabilizado. Ao fim de 21 contabilizações interrompe-se a exploração da vizinhança da atual solução, e inicia-se a exploração da de outra solução.

Na reconstrução de cada percurso, à medida que HM2 vai sendo executada, é considerado um novo arco pela seguinte ordem: 1) sendo fiscalizável, é antecessor de

outro fiscalizável e com maior criticidade associada; 2) sendo fiscalizável, é antecessor de um não fiscalizável e com maior criticidade; 3) sendo não fiscalizável, é antecessor de um fiscalizável com menor tempo de deslocação e 4) sendo não fiscalizável, é antecessor de um não fiscalizável e mais perto de um fiscalizável. A reconstrução do percurso termina quando não é possível adicionar mais nenhuma ligação sem exceder a duração do turno.

Tal como no processo de construção de HCGA, sempre que um arco é selecionado, este só é adicionado ao percurso se houver tempo de regressar ao ponto base mais próximo. Além disso, quando não é possível adicionar um novo arco e o segundo vértice do último arco do percurso não é um ponto base, é adicionado o caminho mais curto entre o último arco incluído no percurso e o ponto base mais próximo.

Assim, caso a criticidade do percurso reconstruído seja superior à do percurso inicial a solução admissível corrente e o seu valor são atualizados. Para cada segmento adicionado ao percurso são atualizadas as variáveis necessárias, uma vez que deixa de poder ser fiscalizado na hora corrente e nas duas adjacentes (antecessora e sucessora).

4.2. Programa em VBA

A metaheurística GRASP foi implementada em *Visual Basic for Applications* (VBA), incluindo o desenvolvimento da heurística construtiva HCGA e das heurísticas melhorativas HM1 e HM2. A metaheurística foi, ainda, integrada num *menu* de modo a facilitar a sua utilização na determinação de percursos de fiscalização.

O *menu* é composto por dois botões, o botão 1 “Inserir Dados” e o botão 2 “Determinar Percursos” (Figura 9 (a)). Para a determinação de percursos, o utilizador deve começar por selecionar o botão 1, sendo encaminhado para uma nova página (Figura 9 (b)), onde deverá proceder à introdução dos dados solicitados. Inseridos os dados, o utilizador regressa ao menu inicial (Figura 9 (a)), onde deverá premir o botão 2 para obter o *output* desejado. Os dados solicitados são referentes ao número de AFE para os quais serão determinados percursos, às características da rede (o número de pontos base, vértices e arcos) e aos parâmetros dos arcos (distâncias, tempo de fiscalização, criticidade e tipo). O tempo de deslocação assumiu-se como sendo proporcional à distância, pelo que não é necessário introduzir este dado.

O programa está desenvolvido para que possam ser obtidos percursos para qualquer número de agentes. Porém, no presente trabalho obtiveram-se resultados apenas para dois AFE, AFE 1 e AFE 2. Para cada um determinou-se um percurso para o turno da manhã e um para o da tarde, considerando-se que o horário 1 se encontra atribuído ao AFE 1 e o horário 2 ao AFE 2 (Figura 1). Assim, uma SA define-se como um conjunto de percursos admissíveis: dois para o AFE 1 e outros dois para o AFE 2.

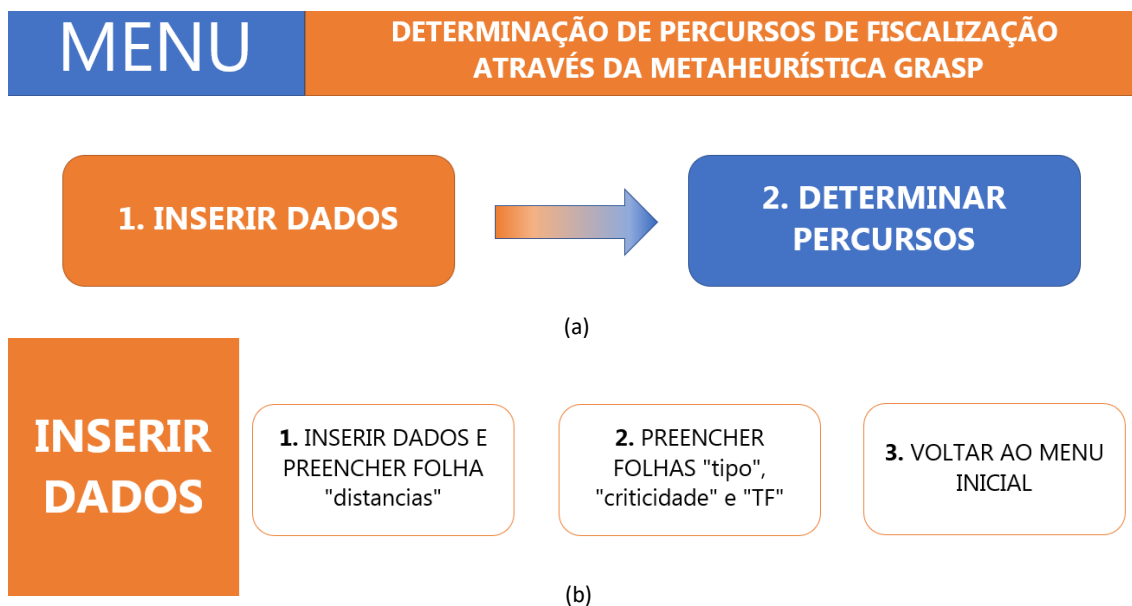


Figura 9 – Menu para a determinação de percursos de fiscalização (a) e página do menu para inserção de dados (b)

5. EXPERIÊNCIA COMPUTACIONAL

5.1. Introdução

Durante a experiência computacional realizada para a obtenção de percursos de fiscalização foi utilizado um computador com processador Intel® Core™ i7-4700HQ Quad Core e frequência 2,4 GHz.

Como referido na secção 2.1, a área de atuação é a Zona 022 – Avenida João XXI, que, segundo Ferreira (2016), se encontra dividida em quatro subzonas (Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4), com características distintas. A determinação dos percursos circunscreveu-se a três destas subzonas Z_1 , Z_2 e Z_4 , cujas representações em rede se podem consultar na Figura F. 1, Figura F. 2 e Figura F. 3 (Anexo F.), respetivamente.

Em cada iteração da metaheurística GRASP (com um número máximo, *maxiter* = 5), a fase construtiva gera uma SA inicial. Nessa fase, e seguindo o critério da qualidade para a construção da lista restrita de candidatos (LRC), é necessária a atribuição de um valor ao parâmetro da GRASP (α) que, por sua vez, influencia todo o processo. Por forma a permitir uma maior diversificação de resultados e uma análise mais completa optou-se por escolher três valores para α . Excluídos os extremos, 0 e 1, uma vez que o primeiro propicia a inclusão de todos os arcos candidatos na LRC e o segundo somente o de maior criticidade, escolheram-se os valores de 0,2, 0,5 e 0,8. Concluída a fase construtiva para cada valor do parâmetro, a fase melhorativa procura gerar uma nova SA, com um valor de criticidade total superior, recorrendo a HM1 e, posteriormente, a HM2. Na experiência computacional atribui-se o valor 21 ao número máximo de iterações da heurística melhorativa (*maxiterHM*) e o valor seis para o número máximo de iterações sem melhoria (*maxitersem*).

Considerando que a metaheurística apresenta uma componente aleatória devido à heurística adotada na fase construtiva – heurística construtiva *greedy* aleatorizada (HCGA) – optou-se por realizar cinco iterações da GRASP para cada valor de α . Em cada iteração foram guardadas as SA obtidas com as três heurísticas (HCGA, HM1 e HM2) e os valores referentes às cinco medidas seguintes: criticidade total, tempo de fiscalização, percentagem de tempo de fiscalização em relação ao tempo total dos percursos (denominada de percentagem de tempo de fiscalização), tempo total dos

percursos e tempo computacional. Conhecer a criticidade total associada a cada SA é indispensável para poder avaliar a qualidade da mesma, uma vez que o problema em estudo tem como único objetivo a maximização da criticidade total. No entanto, a percentagem de tempo de fiscalização e o tempo computacional são também importantes para conhecer o peso do tempo de fiscalização no tempo total do percurso e a rapidez do programa desenvolvido.

Para além dos resultados específicos de cada heurística, calculou-se, para as cinco medidas referidas, a diferença, absoluta e percentual, entre os valores das heurísticas melhorativas e os da construtiva – $((HM1 - HCGA), (HM2 - HCGA), (HM1 - HCGA)\%$ e $(HM2 - HCGA)\%$). A diferença percentual obtém-se através do quociente entre o valor da diferença absoluta e o da medida em estudo da SA da heurística construtiva. Visto que na fase melhorativa da GRASP apenas são aceites SA em que se verifique um aumento da criticidade total, as diferenças absoluta e percentual desta poderão assumir somente valores não negativos. O valor nulo significa que não foi possível melhorar a criticidade total da SA inicial e, como tal, a SA da heurística melhorativa é igual à da construtiva. Contudo, as diferenças absoluta e percentual das restantes medidas poderão assumir valor negativo, nulo ou positivo. Para todas as medidas consideradas para cada heurística foram obtidos valores médios das cinco iterações.

Em suma, para cada subzona Z_1 , Z_2 e Z_4 foram realizadas um total de quinze iterações da metaheurística GRASP, ou seja, cinco para cada valor de α . Nas quinze iterações em cada subzona e para as heurísticas HCGA, HM1 e HM2 foram guardadas as SA, determinados os valores correspondentes às cinco medidas e calculadas as diferenças absolutas e percentuais. Finalmente, foram obtidos os valores médios correspondentes.

5.2. Análise de Resultados

Como referido, em cada uma das cinco iterações da metaheurística GRASP e para cada valor atribuído ao parâmetro α obteve-se, na fase construtiva, uma SA inicial. Seguidamente na fase melhorativa ao aplicar HM1 verificou-se que não foi possível melhorar nenhuma das quinze SA iniciais de cada subzona. Quer isto dizer que na última hora de cada turno, HM1 foi incapaz de substituir uma ligação por duas ligações. No

entanto, com HM2 já foi possível melhorar a maioria das quinze SA iniciais das subzonas Z_1 , Z_2 e Z_4 , obtendo assim novas SA com criticidade total associada superior às obtidas com HCGA.

É importante referir que o número de arcos por tipo é um fator relevante para a eficácia da heurística melhorativa HM1. Note-se que na subzona Z_1 existem 14 arcos do tipo 1, 4 do tipo 2, 6 do tipo 3 e 16 do tipo 4. Na subzona Z_2 é possível distinguir 9 arcos do tipo 1, 4 do tipo 2 e 6 do tipo 4 e na subzona Z_4 6 arcos do tipo 1, 16 do tipo 3 e 18 do tipo 4. Assim, no total, existem 29 arcos do tipo 1, 8 do tipo 2, 22 do tipo 3 e 40 do tipo 4.

Os resultados, determinados através das heurísticas HCGA, HM1 e HM2, encontram-se apresentados separadamente para as subzonas Z_1 , Z_2 e Z_4 e para os diferentes valores de α (0,2; 0,5 e 0,8) na Tabela G. I (Anexo G.) e na Tabela III. Na Tabela G. I, para cada valor atribuído a α , é possível consultar os resultados detalhados para as cinco iterações da metaheurística GRASP, enquanto na Tabela III, para cada α , são apresentados os valores médios obtidos nas cinco iterações.

A análise de resultados, apresentada de seguida, teve em conta os resultados da Tabela III e foi realizada para cada subzona. Esta centrou-se exclusivamente na avaliação, em termos médios, da capacidade de HM2 em melhorar SA iniciais, dado que não se observaram melhorias com HM1.

Na subzona Z_1 verifica-se um aumento da criticidade total de HCGA para HM2, para os três valores de α , registando o maior crescimento (11,08%) para α igual a 0,2. Para o mesmo valor de α , na heurística HM2 observa-se a maior percentagem de tempo de fiscalização (63,85%). Apesar de se ter verificado o maior aumento da criticidade total para α igual a 0,2, este não foi suficiente para superar o maior valor (49 363,60) obtido com HM2 e α igual a 0,5. Assim, na subzona Z_1 a heurística HM2 com α igual a 0,5 obtém, em média, percursos com a maior criticidade total associada, com uma percentagem de tempo de fiscalização média de 62,59% e com um tempo computacional médio de 4,54 segundos.

Na subzona Z_2 , para os três valores de α , HM2 obteve SA com maior valor de criticidade total associada, observando-se o maior aumento (9,31%) para α igual a 0,8.

Este é também o caso em que se observa a maior percentagem de tempo de fiscalização (56,30%). No entanto, é para α igual a 0,5 que se verifica o maior valor de criticidade total, mais precisamente, 31 868,00. Assim, em Z_2 a heurística HM2 com α igual a 0,5 obtém, em média, percursos com a maior criticidade total associada, com uma percentagem de tempo de fiscalização média de 54,23% e com um tempo computacional médio de 4,76 segundos.

Na subzona Z_4 a criticidade total aumentou 8,49%, 13,62% e 28,70% para α igual a 0,2, 0,5 e 0,8, respetivamente, nas soluções geradas por HM2 face às de HCGA. Adicionalmente, verificou-se o maior aumento para α igual a 0,8, e para o mesmo valor de α , observou-se o maior valor de criticidade total, 31 504,40. Assim, em Z_4 a heurística HM2 com α igual a 0,8 obtém, em média, percursos com a maior criticidade total associada, com uma percentagem de tempo de fiscalização média de 63,96% e com um tempo computacional médio de 4,95 segundos.

Em suma, em cada subzona e para cada valor de α , a heurística melhorativa HM2 aparenta, em termos médios, ter a capacidade de conseguir melhorar a criticidade total associada a cada SA inicial. Nas subzonas Z_1 e Z_2 , em termos médios, HM2 apresenta melhores resultados de criticidade total para α igual a 0,5 e na subzona Z_4 para α igual a 0,8.

Tabela III: Resultados da heurística HCGA, HM1 e HM2

Z	α	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₁	0,2	HCGA	40 003,80	521,44	819,91	63,72	0,34
		HM1	40 003,80	521,44	819,91	63,72	0,01
		HM2	43 628,80	527,59	827,18	63,85	4,69
		HM2-HCGA	3 625,00	6,15	7,27	0,13	4,35
		HM2-HCGA (%)	11,08	1,18	0,90	0,22	-
	0,5	HCGA	45 775,80	504,08	814,27	61,81	0,39
		HM1	45 775,80	504,08	814,27	61,81	0,01
		HM2	49 363,60	513,90	820,73	62,59	4,54
		HM2-HCGA	3 587,80	9,83	6,46	0,79	4,15
		HM2-HCGA (%)	7,88	2,00	0,79	1,33	-
	0,8	HCGA	40 953,60	512,76	811,43	63,03	0,38
		HM1	40 953,60	512,76	811,43	63,03	0,01
		HM2	44 626,60	523,88	827,55	63,17	5,20
		HM2-HCGA	3 673,00	11,12	16,12	0,14	4,82
		HM2-HCGA (%)	9,51	2,20	2,01	0,21	-
Z ₂	0,2	HCGA	27 598,00	435,10	817,43	53,47	0,47
		HM1	27 598,00	435,10	817,43	53,47	0,01
		HM2	29 425,00	448,75	826,39	54,47	5,36
		HM2-HCGA	1 827,00	13,64	8,97	1,00	4,89
		HM2-HCGA (%)	7,45	3,31	1,10	2,06	-
	0,5	HCGA	30 251,60	446,47	819,35	54,36	0,47
		HM1	30 251,60	446,47	819,35	54,36	0,01
		HM2	31 868,00	448,34	825,95	54,23	4,76
		HM2-HCGA	1 616,40	1,87	6,61	-0,13	4,30
		HM2-HCGA (%)	5,18	0,48	0,82	-0,19	-
	0,8	HCGA	26 661,40	438,78	817,28	54,11	0,48
		HM1	26 661,40	438,78	817,28	54,11	0,01
		HM2	29 025,20	462,83	825,42	56,30	5,72
		HM2-HCGA	2 363,80	24,05	8,14	2,19	5,24
		HM2-HCGA (%)	9,31	5,61	1,00	4,12	-
Z ₄	0,2	HCGA	27 100,00	519,18	809,05	64,18	0,45
		HM1	27 100,00	519,18	809,05	64,18	0,01
		HM2	29 256,00	530,74	826,64	64,24	4,31
		HM2-HCGA	2 156,00	11,56	17,60	0,06	3,87
		HM2-HCGA (%)	8,49	2,31	2,18	0,15	-
	0,5	HCGA	27 192,40	519,82	813,75	64,04	0,47
		HM1	27 192,40	519,82	813,75	64,04	0,01
		HM2	30 797,20	528,47	828,19	64,03	5,84
		HM2-HCGA	3 604,80	8,66	14,44	-0,01	5,38
		HM2-HCGA (%)	13,62	1,75	1,78	0,02	-
	0,8	HCGA	25 692,80	505,57	802,18	62,80	0,45
		HM1	25 692,80	505,57	802,18	62,80	0,00
		HM2	31 504,40	525,54	822,14	63,96	4,95
		HM2-HCGA	5 811,60	19,97	19,96	1,16	4,50
		HM2-HCGA (%)	28,70	4,14	2,51	1,96	-

HCGA – Heurística Construtiva *Greedy* Aleatorizada; HM1 – Heurística Melhorativa 1; HM2 – Heurística Melhorativa 2; Z – Subzona.

5.3. Soluções Admissíveis Geradas

A título exemplificativo, no Anexo H., encontram-se representadas duas das SA, obtidas para a subzona Z_1 com α igual a 0,5, geradas com uma iteração da metaheurística GRASP. Na Figura H. 1 apresenta-se a SA da fase construtiva da 5ª iteração, em que a Figura H. 1 (a) e a Figura H. 1 (b) correspondem aos percursos do AFE 1 no turno da manhã e da tarde, respetivamente, e as Figura H. 1 (c) e (d) representam igualmente o turno da manhã e da tarde, mas do AFE 2. Já a SA da Figura H. 2 obteve-se na fase melhorativa com HM2, consultando-se os percursos correspondentes aos dois turnos do AFE 1 nas Figura H. 2 (a), (b), e do AFE 2 nas Figura H. 2 (c) e (d). Tal como é possível verificar nas figuras, os percursos obtidos através do *menu* (Figura 9) não fornecem apenas a identificação dos arcos de forma ordenada. Para cada arco é também disponibilizada a hora em que este é atravessado ou fiscalizado, o tempo de deslocação, o tempo de fiscalização e a criticidade associada.

Na análise dos percursos destacam-se dois aspetos. Em primeiro lugar, em cada percurso da Figura H. 1 e da Figura H. 2 um arco (i, j) surge como antecessor de um arco (i, k) sempre que (i, j) é fiscalizado e do tipo 4. Por exemplo, no percurso da Figura H. 1 (b) na hora 14, verifica-se que o arco $(17,16)$ é sujeito a fiscalização e de seguida, o arco $(17,12)$ é atravessado em vazio. Como referido na secção 2.3 as ligações de tipo 4 ao serem fiscalizadas obrigam à fiscalização da ligação oposta, $(16,17)$, ou seja, o arco $(17,16)$ representa o circuito com os dois arcos $((17,16), (16,17))$. Assim, a ligação seguinte tem início em 17, tal como se verifica $((17,12))$. Em segundo lugar, no percurso da Figura H. 1 (c), na hora 12, existe um elevado número de arcos sequenciais que são atravessados sem fiscalização $((2,1), (1,8), (8,9), (9,8), (8,1), (1,8)$ e $(8,14))$. Visto o segundo arco do percurso $((1,8))$ ter fim no vértice 8 e o último $((8,14))$ ter início no mesmo vértice faria sentido passar do arco $(1,8)$ diretamente para, por exemplo, $(8,14)$, eliminando os restantes. No entanto, como a seleção de arcos na construção do percurso é feita de forma aleatória, resulta a sequência indicada.

Comparando a SA inicial (Figura H. 1) com a SA da HM2 (Figura H. 2) verifica-se que apenas não foi possível melhorar o percurso correspondente ao turno da manhã do AFE 1. Enquanto o percurso do mesmo AFE, mas do turno da tarde, aumentou 1 070 (4 878 – 3 808) e os do AFE 2, do turno da manhã e da tarde, tiveram um

aumento de 1 416 (7 489 – 6 073) e 1 489 (14 369 – 12 880), respetivamente. Exemplifica-se assim a capacidade de HM2 em melhorar a criticidade de SA iniciais.

Em suma, através da heurística HM2, foi possível aumentar a criticidade de pelo menos um percurso da SA inicial. Como tal, devem ser adotados os percursos de fiscalização da SA gerada por HM2, com criticidade total superior em 3 975 comparativamente à de HCGA.

6. CONCLUSÃO

No presente TFM propôs-se a otimização de percursos de fiscalização utilizados pela empresa EMEL. Considerando que existem dois horários de trabalho, cada um com dois turnos, pretendia-se determinar dois percursos por cada AFE. Para a resolução do problema propôs-se uma metaheurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), caracterizada por duas fases, a fase construtiva e a fase melhorativa. Na primeira fase, através da heurística construtiva *greedy* aleatorizada (HCGA), pretende-se determinar SA iniciais e, na segunda, melhorar a criticidade total das SA iniciais através de duas heurísticas melhorativas propostas (HM1 e HM2).

Para a determinação dos percursos de fiscalização, a metaheurística GRASP foi implementada na linguagem de programação VBA. Na fase construtiva da heurística HCGA existe um parâmetro α para o qual é necessário fixar um valor entre 0 e 1. Este parâmetro influencia a composição da lista restrita de candidatos (lista a partir da qual são seleccionados arcos) e, por conseguinte, todo o processo de construção de um percurso. Dada a sua influência foram propostos três valores para α (0,2; 0,5 e 0,8). Para cada valor do parâmetro foram realizadas cinco iterações da heurística construtiva, obtendo-se com HCGA quinze SA iniciais, como pretendido.

Na fase melhorativa, a heurística HM1 demonstrou ser incapaz de melhorar a criticidade total associada a cada uma das quinze SA iniciais. O facto da substituição de uma ligação por duas ligações ser realizada apenas para a última hora do turno pode ser uma das causas do insucesso de HM1. A HM2, em termos médios, aparenta ter a capacidade de melhorar SA iniciais. Nas subzonas Z_1 e Z_2 , para α igual a 0,5, foi obtido o melhor valor de criticidade total, em termos médios. Na subzona Z_4 verificou-se o mesmo, mas para α igual a 0,8. No que diz respeito à percentagem de tempo de fiscalização, com α igual a 0,5 em Z_1 e Z_2 e com α igual a 0,8 em Z_4 , verifica-se que, em termos médios, HM2 apresenta valores superiores relativamente aos valores obtidos com HCGA. No entanto, a heurística HM2, como esperado, apresenta, em média, valores de tempo computacional bastante superiores aos de HCGA. Assim, na fase melhorativa da metaheurística GRASP deve ser aplicada a heurística melhorativa HM2 na

determinação de percursos de fiscalização. Quando esta é realizada para as subzonas Z_1 e Z_2 recomenda-se igualar α a 0,5 e quando realizada para a subzona Z_4 , igualar α a 0,8.

Futuramente, poderão ser introduzidas melhorias no método e na sua implementação em VBA. No que diz respeito a HM1, seria interessante desenvolver novas análises para testar a sua capacidade de melhoria de SA iniciais, nomeadamente, verificar se circunscrever a pesquisa apenas à última hora é a causa da limitação, estendendo a mais horas do turno. Para HM2, e adotando novamente os três valores de α , seria igualmente interessante obter resultados para um maior número de iterações (além das cinco para cada valor de α), de modo a avaliar se a escolha de α , em cada subzona, se manteria.

Relativamente à implementação em VBA a forma de obtenção das cinco iterações e dos valores médios poderá ser melhorada. Na versão atual, é gerada cada SA através da metaheurística e os cálculos dos resultados médios não são elaborados através do menu do programa desenvolvido. Como tal, a automatização de ambas as tarefas seria uma mais valia, uma vez que tornaria o programa mais eficiente e de mais fácil utilização.

Em suma, através da metodologia adotada e da sua implementação em VBA foi possível cumprir o objetivo proposto, ou seja, a determinação de dois percursos para cada um dos dois AFE. Na fase construtiva da metaheurística GRASP obtiveram-se SA iniciais e posteriormente, na fase melhorativa, com recurso a HM2, foi possível melhorá-las. Em trabalhos futuros recomenda-se a determinação de percursos de fiscalização através da metaheurística GRASP, com a aplicação da heurística HM2 na fase melhorativa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Câmara Municipal de Lisboa (2016). *Boletim Municipal – Republicação do Regulamento Geral de Estacionamento e Paragem na Via Pública*. pp. 1944(80)-1944(241).

Disponível em:

https://www.emel.pt/fotos/legislacao/boletim_municipal_lr_2329090259d4c194e916e.pdf [Acesso em: 2020/08/07].

Corberán, Á. & Laporte, G. (2014). *Arc Routing: Problems, Methods, and Applications*. Philadelphia: MOS-SIAM Series on Optimization.

Cortinhal, MJ., Mourão, MC. & Nunes, AC. (2016). Local search heuristics for sectoring routing in a household waste collection context, *European Journal of Operational Research* 255, 68-79.

EMEL (2018). *Plano de Atividades e Orçamento 2019*.

Disponível em:

https://www.emel.pt/fotos/financeiro/pao_2019_15603513265cf14844e7656.pdf [Acesso em: 2020/08/13].

EMEL (2020a). *A empresa*.

Disponível em:

<https://www.emel.pt/pt/a-emel/a-empresa/> [Acesso em: 2020/08/13].

EMEL (2020b). *Fiscalização*.

Disponível em:

<https://www.emel.pt/pt/mobilidade/a-mobilidade/accao-emel/fiscalizacao/> [Acesso em: 2020/08/14].

EMEL (2020c). *Zonas de Acesso Automóvel Condicionado*.

Disponível em:

<https://www.emel.pt/pt/onde-estacionar/bairros-historicos/zonas-de-acesso-automovel-condicionado/> [Acesso em: 2020/08/14].

Ferreira, R. (2016). *Otimização de Percursos de Fiscalização Apeada de Estacionamento*. Trabalho Final de Mestrado em Métodos Quantitativos para a Decisão Económica e Empresarial, Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Lacomme, P., Prins, C. & Ramdane-Chérif, W. (2001). A Genetic Algorithm for the Capacitated Arc Routing Problem and its Extensions. In: E.J.W. Boers et al. (Eds.) *EvoWorkshop. Applications of Evolutionary Computing*, LNCS 2037, Springer, pp. 473-483

Talbi, E. (2009). *Metaheuristics from Design to Implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Usberti, FL., França, PM. & França, ALM. (2013). GRASP with evolutionary path-relinking for the capacitated arc routing problem. *Computer Operations Research* 40, 3206-3217

ANEXOS

Anexo A. Representação Zona 022 – Avenida João XXI

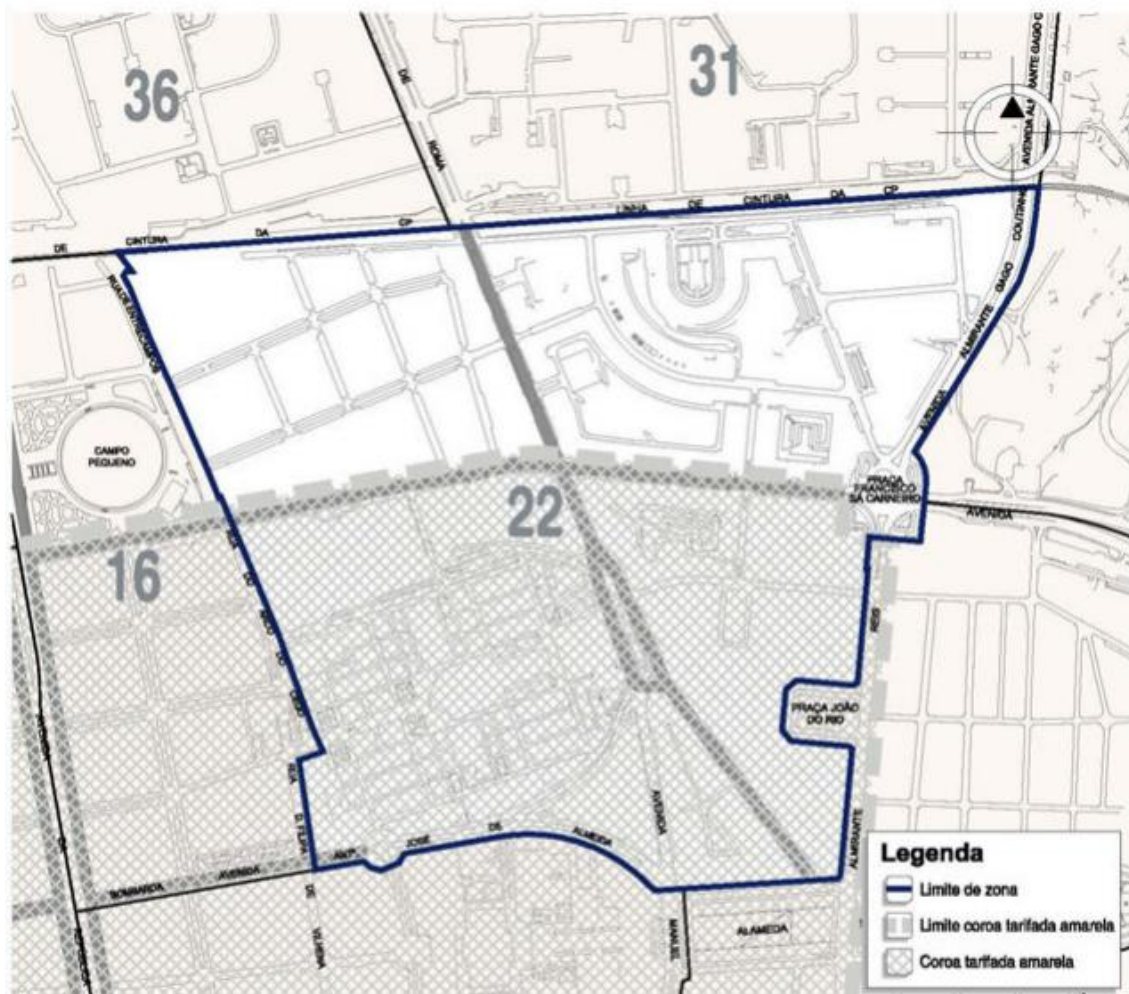


Figura A. 1 – Representação Zona 022 – Avenida João XXI. Fonte: Câmara Municipal de Lisboa (2016)

**Anexo B. Notação para os Pseudocódigos da Heurística Construtiva
Greedy Aleatorizada e das Melhorativas**

Tabela B. I: Definição da notação referente à heurística construtiva *greedy* aleatorizada

NOTAÇÃO	TIPO	DESCRIÇÃO
α	[0,1]	Parâmetro necessário para cálculo de <i>criterio</i>
δ_{ih}^+	vetor	Arcos que saem do nodo i e são candidatos a fiscalização durante a hora h
$\delta_{conetor_i}^+$	vetor	Arcos que saem do nodo i e são candidatos a serem atravessados sem fiscalização
c'_i	vetor	Criticidade dos arcos em δ_{ih}^+
cmc_j	vetor	Caminho mais curto entre o nodo j e o ponto base mais próximo
<i>Criticidade_total</i>	real	Criticidade total da solução
C_{ijh}	real	Criticidade de (i, j) durante h
$C_{total_{tk}}$	real	Criticidade total do percurso do turno t do AFE k
<i>criterio</i>	[min, max]	Valor que permite escolher os candidatos a integrar a lista restrita de candidatos
<i>existe_arco</i>	booleana	TRUE se existir pelo menos um arco que pode ser incluído no percurso sem violar restrições, e FALSE c.c.
$fiscalizado_{ijh}$	{0, h}	h se (i, j) é fiscalizado durante h , 0 c.c.
$fiscalizavel_{ijh}$	booleana	TRUE se (i, j) pode ser fiscalizado durante h , e FALSE c.c.
h	inteiro	Hora do relógio
H	conjunto	Conjunto de horas de exploração
$hora_{inicio_{tk}}$	inteiro	Hora de início do turno t atribuído ao AFE k
k	inteiro	AFE
K	conjunto	Conjunto de AFE
<i>LRC</i>	vetor	Lista restrita de candidatos, i.e., arcos com criticidade \geq <i>criterio</i>
<i>max</i>	real	Valor máximo no vetor c'_i
<i>min</i>	real	Valor mínimo no vetor c'_i

NOTAÇÃO	TIPO	DESCRIÇÃO
$muda_h$	real	Indica necessidade de incrementar h
$percurso_{tk}$	vetor	Arcos pertencentes ao percurso do turno t do AFE k
$ponto_base_k$	inteiro	Ponto base utilizado pelo AFE k
$soma_t$	real	Tempo despendido desde o início (ponto base) até ao nodo final, j , do último arco (i, j) adicionado ao percurso, em minutos
$soma_t_{tk}$	real	Duração efetiva do percurso do turno t do AFE k
t	$\{1,2\}$	Turno
TL_{tk}	inteiro	Duração do turno t do AFE k
t_{ijh}	real	Tempo de deslocação e fiscalização no arco (i, j) durante a hora h , em minutos
TD_{ij}	real	Tempo de deslocação em vazio em (i, j) , em minutos
TF_{ijh}	real	Tempo de fiscalização em (i, j) na hora h , em minutos
t_{cmc_j}	real	Tempo do cmc_j , em minutos
t_{usado}	real	Tempo total do percurso, em minutos
$SA(HCGA)$	conjunto	Solução admissível obtida com HCGA
V'	conjunto	Pontos base
V	conjunto	Vértices da rede

Tabela B. II: Definição da notação complementar referente às heurísticas melhorativas HM1 e HM2

NOTAÇÃO	TIPO	DESCRIÇÃO
$folga_{tk}$	real	Diferença entre a duração do turno t do AFE k e a do percurso gerado para o mesmo turno/AFE
$SA(HM1)$	conjunto	Solução admissível obtida com HM1
$SA(HM2)$	conjunto	Solução admissível obtida com HM2

Anexo C. Pseudocódigo da Heurística Construtiva Greedy Aleatorizada

Procedimento <i>heuristica_construtiva_greedy_aleatorizada</i> (HCGA)	
<hr/>	
Input: $ K , TL_{tk}, hora_inicio_{tk}, rede$	
$SA(HCGA) = \emptyset$	
$Criticidade_total = 0$	
Para $k = 1$ até $ K $	
Para $t = 1$ até 2	
$h = hora_inicio_{tk}$	
$soma_t = 0$	
$muda_h = 0$	
$C_total_{tk} = 0$	
$existe_arco = TRUE$	
Selecionar aleatoriamente $ponto_base_k \in V'$	
$i = ponto_base_k$	
Enquanto $existe_arco = TRUE$	
Call <i>selecao_de_arcos</i>	
Call <i>verificacao_de_tempo</i>	
Call <i>adicao_de_arcos_ao_percurso</i>	
FimEnquanto	
Guardar $percurso_{tk}, C_total_{tk}, soma_t_{tk}, vetor_C_{tk}, vetor_hora_{tk}, vetor_t_{tk}$	
Atualizar $SA(HCGA)$ incluindo $percurso_{tk}$	
$Criticidade_total = Criticidade_total + C_total_{tk}$	
FimPara	//Para cada turno
FimPara	// Para cada AFE
$SA = SA(HCGA)$	// Solução admissível corrente
<hr/>	
Output: $SA(HCGA), Criticidade_total, \forall t, k: C_total_{tk}, soma_t_{tk}$	
<hr/>	

Figura C. 1 – Pseudocódigo da heurística construtiva *greedy* aleatorizada

Procedimento selecao_de_arcos

Input: $\alpha; i$
 δ_{ih}^+ // Vetor de candidatos
 // Verificar se existe algum arco em δ_{ih}^+
Se $Ubound(\delta_{ih}^+) \geq 1$ // $Ubound$ é a dimensão do vetor
 $c'_i = [\text{vetor de criticidade dos candidatos em } \delta_{ih}^+]$
 $min = \text{Min}_j \{C_{ijh} : C_{ijh} \text{ está em } c'_i\}$
 $max = \text{Max}_j \{C_{ijh} : C_{ijh} \text{ está em } c'_i\}$
 $criterio = min + \alpha (max - min)$ // Critério de qualidade
 $LRC = [\text{vetor dos segmentos em } \delta_{ih}^+ : \text{criticidade} \geq \text{criterio}]$
 Seja (i, j) um arco escolhido aleatoriamente de LRC
Senão
 $\delta_{conetor_i^+} = [\text{vetor de conetores com início em } i]$
 Seja (i, j) um arco escolhido aleatoriamente de $\delta_{conetor_i^+}$
FimSe
Se $fiscalizavel_{ijh} = TRUE$ $t_{ijh} = TD_{ij} + TF_{ijh}$
Senão $t_{ijh} = TD_{ij}$
FimSe

Output: $(i, j), t_{ijh}$

Figura C. 2 – Pseudocódigo do procedimento “selecao_de_arcos”

Procedimento verificacao_de_tempo

Input: $\alpha, (i, j), soma_t, t_{ijh}$
 Identificar cmc_j // Caminho mais curto de j ao ponto base
 Calcular t_cmc_j
 $t_usado = soma_t + t_{ijh} + t_cmc_j$ // Tempo total do percurso corrente
Enquanto $t_usado > TL_{tk}$
 Se $fiscalizavel_{ijh} = TRUE$ // arco (i, j) é segmento fiscalizável
 Retirar arco (i, j) de δ_{ih}^+
 Retirar de c'_i a criticidade do arco (i, j)
 Se $C_{ijh} = min$; Atualizar min
 Senão Se $C_{ijh} = max$; Atualizar max
 FimSe
 $criterio = min + \alpha (max - min)$
 FimSe
 $LRC = [\text{vetor de arcos em } \delta_{ih}^+ : \text{criticidade} \geq \text{criterio}]$
 Se \exists arcos em LRC
 Escolher aleatoriamente (i, j) de LRC
 $t_{ijh} = TD_{ij} + TF_{ijh}$
 Identificar cmc_j
 Calcular t_cmc_j
 $t_usado = soma_t + t_{ijh} + t_cmc_j$
 Senão
 Se $i \in V'$ $t_usado = soma_t$ // i é ponto base
 Senão $t_usado = soma_t + t_cmc_i$
 FimSe
 $existe_arco = FALSE$
 FimSe
 Senão
 Retirar o arco (i, j) de $\delta_{conetor_i}^+$
 Se \exists arcos em $\delta_{conetor_i}^+$
 Escolher aleatoriamente (i, j) de $\delta_{conetor_i}^+$
 $t_{ijh} = TD_{ij}$
 Identificar cmc_j e calcular t_cmc_j
 $t_usado = soma_t + t_{ijh} + t_cmc_j$
 Senão
 Se $i \in V'$ $t_usado = soma_t$ // i é ponto base
 Senão $t_usado = soma_t + t_cmc_i$
 FimSe
 $existe_arco = FALSE$
 FimSe
 FimSe
 FimEnquanto
Output: $(i, j), t_{ijh}, existe_arco, t_usado$

Figura C. 3 – Pseudocódigo do procedimento “verificacao_de_tempo”

Procedimento `adicao_arcos_ao_percurso`

Input: (i, j) , t_{ijh} , $existe_arco$, t_usado

Se $existe_arco = TRUE$

Incluir (i, j) no vetor $percurso_{tk}$

Incluir C_{ijh} em $vetor_C_{tk}$

$C_total_{tk} = C_total_{tk} + C_{ijh}$

Se $fiscalizavel_{ijh} = TRUE$

$fiscalizado_{ijh} = h$

$fiscalizavel_{ij(h-1)} = FALSE$

$fiscalizavel_{ijh} = FALSE$

$fiscalizavel_{ij(h+1)} = FALSE$

FimSe

$soma_t = soma_t + t_{ijh}$

$muda_h = muda_h + t_{ijh}$

$i = j$

Se $muda_h \geq 60$

$h = h + 1$

$muda_h = muda_h - 60$

FimSe

Senão

$soma_t = t_usado$

Se $i \notin V'$

Identificar cmc_i e calcular t_cmc_i

Incluir cmc_i no vetor $percurso_{tk}$

$muda_h = muda_h + t_cmc_i$

FimSe

Se $muda_h \geq 60$

$h = h + 1$

$muda_h = muda_h - 60$

FimSe

$soma_t_{tk} = soma_t$

// Duração efetiva do percurso

FimSe

Output: $existe_arco$, (i, j) , $\forall t, k: C_total_{tk}$, $percurso_{tk}$, $soma_t_{tk}$

Figura C. 4 – Pseudocódigo do procedimento “`adicao_arcos_ao_percurso`”

Anexo D. Pseudocódigo da Heurística Melhorativa (HM1)

Procedimento heuristica_melhorativa_1 (HM1)

Input: $SA(HCGA)$, $|K|$, $Criticidade_total$, $\forall t, k: C_total_{tk}$, TL_{tk} , $soma_t_{tk}$,
 $vetor_hora_{tk}$ // Inicialização

$SA(HM1) = SA(HCGA)$

Para $k = 1$ até $|K|$

Para $t = 1$ até 2 // Considerar solução corrente SA

$folga_{tk} = TL_{tk} - soma_t_{tk}$
 $h = hora_ultima_{tk}$

Enquanto $\exists (a, b)$ não analisado, percorrido na hora h do $percurso_{tk}$

Enquanto $(\exists (a, u), (u, b))$ disponível para incluir no percurso na hora h e $(dif \leq 0)$

Se (tempo de incluir $(a, u), (u, b)$ é compatível com $folga_{tk}$)

$dif = (C_{auh} + C_{ubh}) - C_{abh}$

FimSe

FimEnquanto

Se $dif > 0$

 Atualizar variáveis (*fiscalizado; fiscalizavel*)

$Criticidade_total = Criticidade_total + dif$

$C_total_{tk} = C_total_{tk} + dif$

$folga_{tk} = folga_{tk} + dif$

 Atualizar $SA(HM1)$ substituindo (a, b) por $(a, u), (u, b)$ no $percurso_{tk}$

FimSe

FimEnquanto

FimPara // Para cada turno

FimPara // Para cada AFE

Output: $SA(HM1)$ - dois percursos para cada AFE, $Criticidade_total$

Figura D. 1 – Pseudocódigo da heurística melhorativa 1

Anexo E. Pseudocódigo da Heurística Melhorativa (HM2)

Procedimento heuristica_melhorativa_2 (HM2)

Input: $SA(HCGA)$, $|K|$, $Criticidade_total$, $\forall t, k: C_total_{tk}$, TL_{tk} , $soma_t_{tk}$

Para $k = |K|$ até 1

Para $t = 1$ até 2

Enquanto \exists conetor (a, b) disponível para eliminar

Eliminar percurso desde (a, b) no $percurso_{tk}$

Atualizar $(C_total_{tk}$ e $soma_t_{tk})$

$soma_t = soma_t_{tk}$

Enquanto $\exists (i, j)$ disponível para inserir

Identificar cmc_j e calcular t_cmc_j

$t_usado = soma_t + t_{ijh} + t_cmc_j$

Se $t_usado \leq TL_{tk}$

Adicionar (i, j) ao $percurso_{tk}$

Atualizar variáveis ($fiscalizado$; $fiscalizavel$)

$C_total_{tk} = C_total_{tk} + C_{ijh}$

Se (i, j) é fiscalizável e antecessor de (j, l) não fiscalizável

Identificar $cmc_fiscalizavel_l$ // CMC de l ao arco
fiscalizável mais perto

Calcular $t_cmc_fiscalizavel_l$

$t_usado = soma_t + t_cmc_fiscalizavel_l$

Se $t_usado \leq TL_{tk}$

Adicionar $cmc_fiscalizavel_l$ ao $percurso_{tk}$

FimSe

FimSe

FimSe

Atualizar ($soma_t$; $muda_h$; h)

FimEnquanto

Se $i \notin V'$

Identificar cmc_i e calcular t_cmc_i

Incluir cmc_i no vetor $percurso_{tk}$

FimSe

Se $C_total_{tk} > (Criticidade_percurso_inicial)$

Atualizar $SA(HM2)$ substituindo percurso inicial por $percurso_{tk}$

Atualizar $Criticidade_total$

FimSe

FimEnquanto

FimPara

// Para cada turno

FimPara

// Para cada AFE

Output: $SA(HM2)$ - dois percursos para cada AFE, $Criticidade_total$

Figura E. 1 – Pseudocódigo da heurística melhorativa 2

Anexo F. Redes das Subzonas Z₁, Z₂ e Z₄ da Zona 022 – Av. João XXI

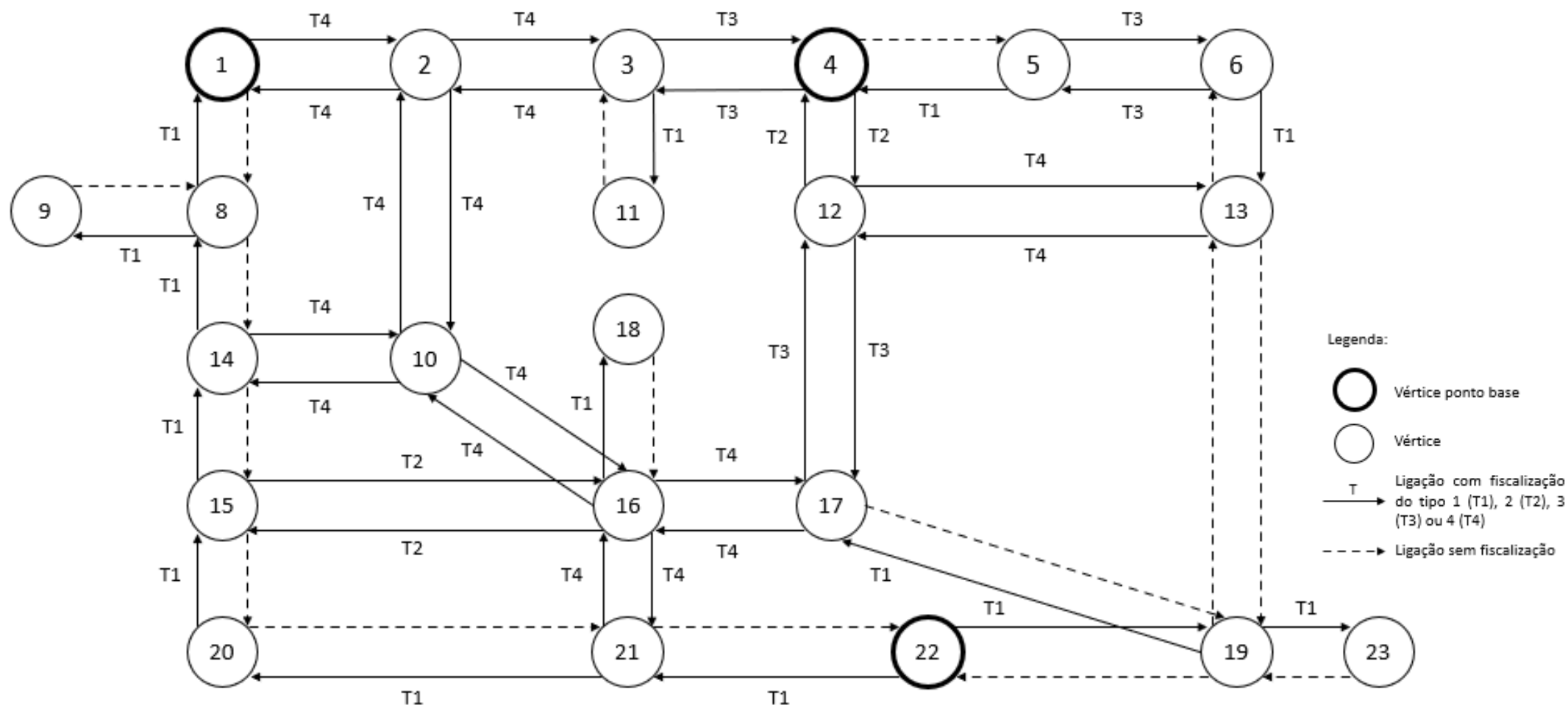


Figura F. 1 – Rede correspondente à subzona Z_1 (baseado em Ferreira, 2016)

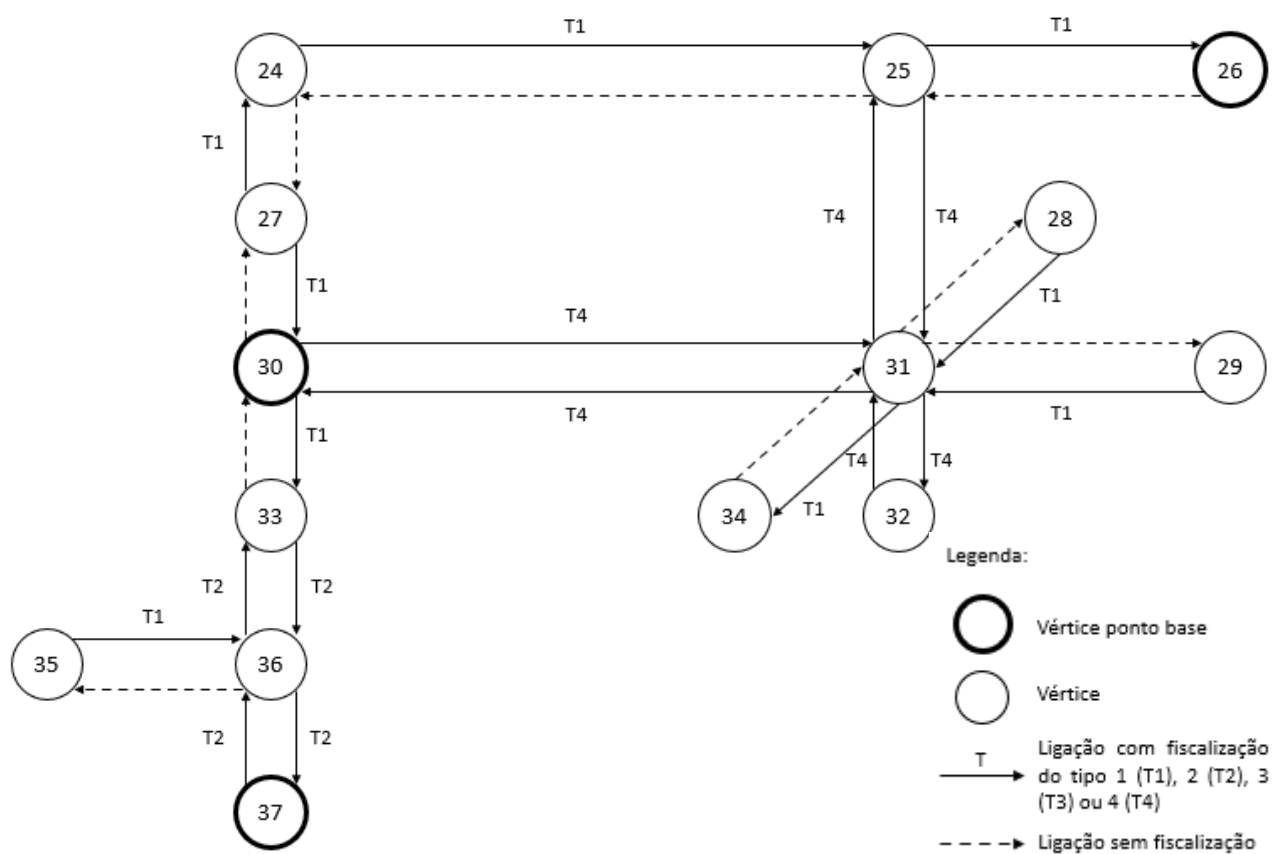
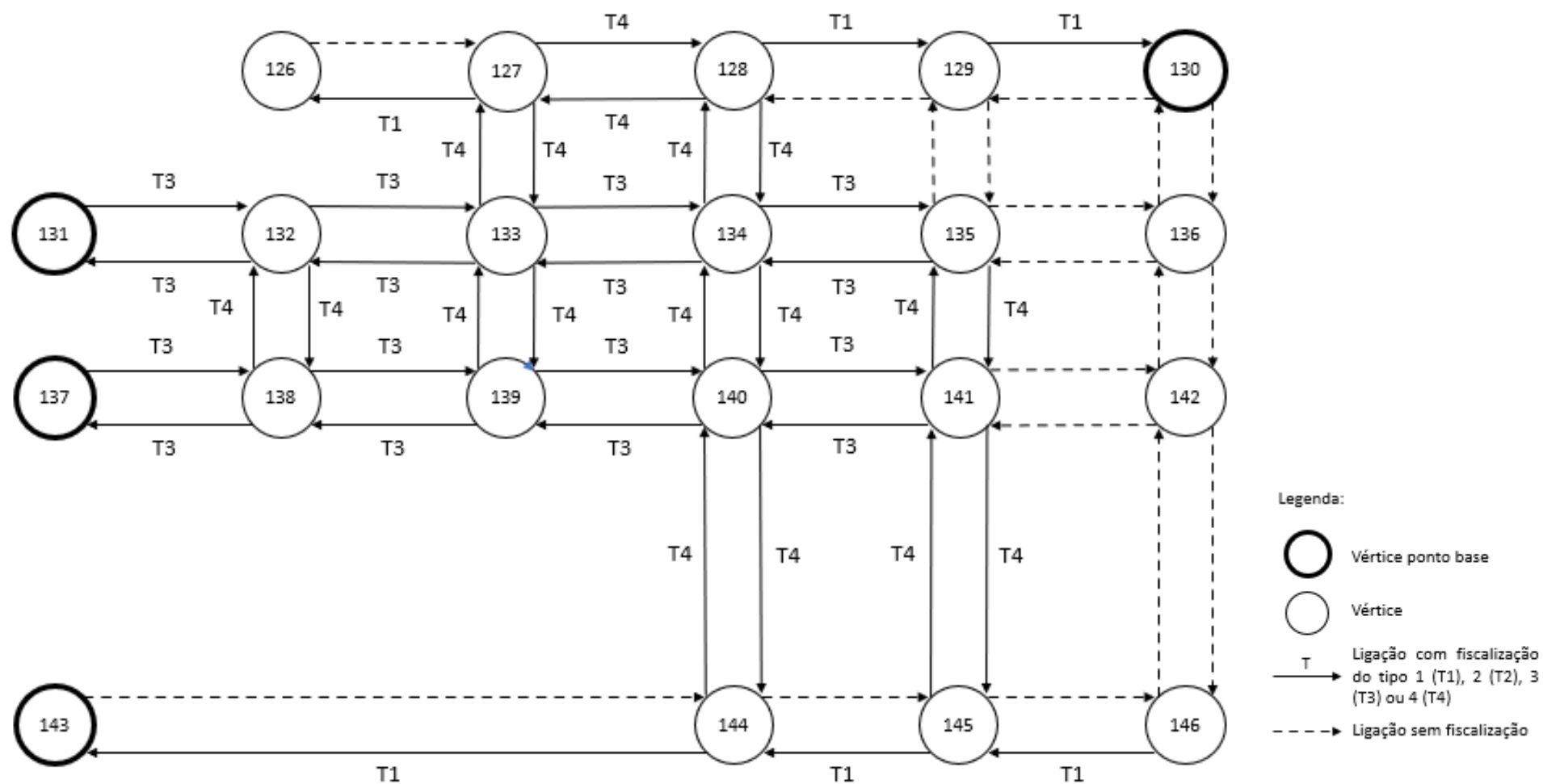


Figura F. 2 – Rede correspondente à subzona Z_2 (baseado em Ferreira, 2016)

Figura F. 3 – Rede correspondente à subzona Z₄ (baseado em Ferreira, 2016)

Anexo G. Resultados por Subzona e α em cada Iteração

Tabela G. I: Resultados da heurística HCGA, HM1 e HM2 em cada iteração

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₁	0,2	1	HC	31 986,00	521,26	822,01	63,67	0,32
			HM1	31 986,00	521,26	822,01	63,67	0,00
			HM2	37 974,00	524,89	831,00	63,21	4,77
			(HM2-HC)	5 988,00	3,63	8,99	-0,46	4,45
			(HM2-HC) (%)	18,72	0,70	1,09	-0,72	-
		2	HC	42 952,00	524,02	834,53	63,19	0,34
			HM1	42 952,00	524,02	834,53	63,19	0,00
			HM2	44 544,00	529,22	836,30	63,37	5,17
			(HM2-HC)	1 592,00	5,20	1,77	0,18	4,83
			(HM2-HC) (%)	3,71	0,99	0,21	0,28	-
		3	HC	43 274,00	519,44	793,97	65,49	0,34
			HM1	43 274,00	519,44	793,97	65,49	0,00
			HM2	44 243,00	524,58	810,21	64,92	3,69
			(HM2-HC)	969,00	5,14	16,24	-0,57	3,34
			(HM2-HC) (%)	2,24	0,99	2,05	-0,87	-
		4	HC	51 648,00	522,98	818,26	63,83	0,30
			HM1	51 648,00	522,98	818,26	63,83	0,02
			HM2	52 376,00	532,12	829,62	64,10	4,98
			(HM2-HC)	728,00	9,14	11,36	0,27	4,69
			(HM2-HC) (%)	1,41	1,75	1,39	0,43	-
		5	HC	30 159,00	519,50	830,80	62,42	0,42
			HM1	30 159,00	519,50	830,80	62,42	0,01
			HM2	39 007,00	527,13	828,79	63,65	4,86
			(HM2-HC)	8 848,00	7,63	-2,01	1,23	4,44
			(HM2-HC) (%)	29,34	1,47	-0,24	1,97	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₁	0,5	1	HC	48 093,00	485,86	824,71	58,47	0,44
			HM1	48 093,00	485,86	824,71	58,47	0,00
			HM2	54 653,00	507,47	831,17	60,97	5,05
			(HM2-HC)	6 560,00	21,61	6,46	2,51	4,62
			(HM2-HC) (%)	13,64	4,45	0,78	4,28	-
		2	HC	45 119,00	503,00	818,62	61,30	0,37
			HM1	45 119,00	503,00	818,62	61,30	0,03
			HM2	52 031,00	533,76	835,08	64,02	3,45
			(HM2-HC)	6 912,00	30,76	16,46	2,72	3,09
			(HM2-HC) (%)	15,32	6,12	2,01	4,43	-
		3	HC	47 069,00	516,66	812,84	63,94	0,38
			HM1	47 069,00	516,66	812,84	63,94	0,00
			HM2	47 238,00	513,30	813,00	63,45	3,91
			(HM2-HC)	169,00	-3,36	0,16	-0,49	3,53
			(HM2-HC) (%)	0,36	-0,65	0,02	-0,77	-
		4	HC	46 265,00	516,06	808,68	63,38	0,38
			HM1	46 265,00	516,06	808,68	63,38	0,02
			HM2	46 588,00	509,78	805,44	62,94	3,28
			(HM2-HC)	323,00	-6,28	-3,24	-0,45	2,91
			(HM2-HC) (%)	0,70	-1,22	-0,40	-0,70	-
		5	HC	42 333,00	498,80	806,49	61,95	0,38
			HM1	42 333,00	498,80	806,49	61,95	0,00
			HM2	46 308,00	505,21	818,95	61,59	7,01
			(HM2-HC)	3 975,00	6,41	12,46	-0,36	6,63
			(HM2-HC) (%)	9,39	1,29	1,54	-0,58	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₁	0,8	1	HC	49 644,00	518,17	809,60	63,85	0,38
			HM1	49 644,00	518,17	809,60	63,85	0,00
			HM2	50 221,00	527,30	830,53	63,37	4,68
			(HM2-HC)	577,00	9,13	20,93	-0,48	4,30
			(HM2-HC) (%)	1,16	1,76	2,59	-0,76	-
		2	HC	41 338,00	495,79	822,33	60,38	0,36
			HM1	41 338,00	495,79	822,33	60,38	0,02
			HM2	45 176,00	485,13	820,81	59,16	5,76
			(HM2-HC)	3 838,00	-10,66	-1,52	-1,22	5,40
			(HM2-HC) (%)	9,28	-2,15	-0,18	-2,02	-
		3	HC	34 144,00	527,44	818,80	64,07	0,38
			HM1	34 144,00	527,44	818,80	64,07	0,02
			HM2	38 551,00	538,99	832,42	64,53	5,04
			(HM2-HC)	4 407,00	11,55	13,62	0,47	4,66
			(HM2-HC) (%)	12,91	2,19	1,66	0,73	-
		4	HC	39 301,00	534,27	818,35	64,78	0,34
			HM1	39 301,00	534,27	818,35	64,78	0,00
			HM2	47 858,00	542,89	833,27	64,70	4,08
			(HM2-HC)	8 557,00	8,62	14,92	-0,08	3,73
			(HM2-HC) (%)	21,77	1,61	1,82	-0,13	-
		5	HC	40 341,00	488,13	788,08	62,09	0,45
			HM1	40 341,00	488,13	788,08	62,09	0,00
			HM2	41 327,00	525,11	820,73	64,09	6,43
			(HM2-HC)	986,00	36,98	32,65	2,01	5,98
			(HM2-HC) (%)	2,44	7,58	4,14	3,23	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₂	0,2	1	HC	22 769,00	412,43	817,62	50,26	0,48
			HM1	22 769,00	412,43	817,62	50,26	0,00
			HM2	27 853,00	453,99	825,33	54,61	4,47
			(HM2-HC)	5 084,00	41,56	7,71	4,36	3,99
			(HM2-HC) (%)	22,33	10,08	0,94	8,67	-
		2	HC	33 713,00	431,50	819,55	53,37	0,48
			HM1	33 713,00	431,50	819,55	53,37	0,02
			HM2	33 798,00	432,93	831,84	52,52	4,77
			(HM2-HC)	85,00	1,43	12,29	-0,85	4,29
			(HM2-HC) (%)	0,25	0,33	1,50	-1,60	-
		3	HC	22 492,00	439,37	818,79	53,95	0,44
			HM1	22 492,00	439,37	818,79	53,95	0,00
			HM2	23 022,00	450,91	824,77	55,08	5,79
			(HM2-HC)	530,00	11,54	5,98	1,13	5,35
			(HM2-HC) (%)	2,36	2,63	0,73	2,10	-
		4	HC	32 879,00	462,51	808,82	57,28	0,42
			HM1	32 879,00	462,51	808,82	57,28	0,00
			HM2	33 934,00	441,58	821,30	54,27	5,31
			(HM2-HC)	1 055,00	-20,93	12,48	-3,01	4,89
			(HM2-HC) (%)	3,21	-4,53	1,54	-5,25	-
		5	HC	26 137,00	429,70	822,35	52,52	0,55
			HM1	26 137,00	429,70	822,35	52,52	0,03
			HM2	28 518,00	464,32	828,73	55,88	6,47
			(HM2-HC)	2 381,00	34,62	6,38	3,36	5,92
			(HM2-HC) (%)	9,11	8,06	0,78	6,39	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₂	0,5	1	HC	32 063,00	460,06	809,69	56,62	0,43
			HM1	32 063,00	460,06	809,69	56,62	0,00
			HM2	33 776,00	458,34	831,61	55,16	5,77
			(HM2-HC)	1 713,00	-1,72	21,92	-1,46	5,34
			(HM2-HC) (%)	5,34	-0,37	2,71	-2,58	-
		2	HC	28 001,00	432,34	830,38	52,51	0,48
			HM1	28 001,00	432,34	830,38	52,51	0,00
			HM2	28 001,00	432,34	830,38	52,51	3,71
			(HM2-HC)	0,00	0,00	0,00	0,00	3,23
			(HM2-HC) (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	-
		3	HC	31 155,00	474,40	817,63	57,03	0,49
			HM1	31 155,00	474,40	817,63	57,03	0,00
			HM2	31 155,00	474,40	817,63	57,03	4,30
			(HM2-HC)	0,00	0,00	0,00	0,00	3,80
			(HM2-HC) (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	-
		4	HC	27 310,00	411,05	803,55	51,46	0,46
			HM1	27 310,00	411,05	803,55	51,46	0,03
			HM2	29 161,00	426,12	815,74	52,64	3,80
			(HM2-HC)	1 851,00	15,07	12,19	1,18	3,34
			(HM2-HC) (%)	6,78	3,67	1,52	2,29	-
		5	HC	32 729,00	454,48	835,49	54,17	0,48
			HM1	32 729,00	454,48	835,49	54,17	0,00
			HM2	37 247,00	450,50	834,41	53,82	6,23
			(HM2-HC)	4 518,00	-3,98	-1,08	-0,35	5,76
			(HM2-HC) (%)	13,80	-0,88	-0,13	-0,65	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₂	0,8	1	HC	24 940,00	407,64	807,29	51,49	0,54
			HM1	24 940,00	407,64	807,29	51,49	0,00
			HM2	28 663,00	453,75	830,40	55,45	5,66
			(HM2-HC)	3 723,00	46,11	23,11	3,96	5,13
			(HM2-HC) (%)	14,93	11,31	2,86	7,69	-
		2	HC	23 309,00	439,55	820,76	54,22	0,45
			HM1	23 309,00	439,55	820,76	54,22	0,03
			HM2	27 703,00	461,45	829,42	55,64	6,03
			(HM2-HC)	4 394,00	21,90	8,66	1,42	5,58
			(HM2-HC) (%)	18,85	4,98	1,06	2,61	-
		3	HC	27 711,00	431,04	820,75	52,57	0,48
			HM1	27 711,00	431,04	820,75	52,57	0,00
			HM2	28 277,00	447,75	821,89	54,85	5,66
			(HM2-HC)	566,00	16,71	1,14	2,29	5,19
			(HM2-HC) (%)	2,04	3,88	0,14	4,35	-
		4	HC	23 913,00	466,35	818,45	56,82	0,47
			HM1	23 913,00	466,35	818,45	56,82	0,02
			HM2	25 049,00	471,46	824,99	56,98	5,52
			(HM2-HC)	1 136,00	5,11	6,54	0,17	5,05
			(HM2-HC) (%)	4,75	1,10	0,80	0,29	-
		5	HC	33 434,00	449,33	819,17	55,47	0,45
			HM1	33 434,00	449,33	819,17	55,47	0,00
			HM2	35 434,00	479,73	820,40	58,60	5,70
			(HM2-HC)	2 000,00	30,40	1,23	3,13	5,25
			(HM2-HC) (%)	5,98	6,77	0,15	5,64	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₄	0,2	1	HC	27 753,00	529,93	801,61	66,14	0,40
			HM1	27 753,00	529,93	801,61	66,14	0,02
			HM2	30 201,00	528,56	818,16	64,84	3,38
			(HM2-HC)	2 448,00	-1,37	16,55	-1,30	2,98
			(HM2-HC) (%)	8,82	-0,26	2,06	-1,97	-
		2	HC	30 357,00	536,79	813,36	66,07	0,39
			HM1	30 357,00	536,79	813,36	66,07	0,00
			HM2	32 205,00	534,96	829,39	64,80	3,05
			(HM2-HC)	1 848,00	-1,83	16,03	-1,27	2,66
			(HM2-HC) (%)	6,09	-0,34	1,97	-1,93	-
	0,4	3	HC	31 073,00	503,36	806,67	62,49	0,45
			HM1	31 073,00	503,36	806,67	62,49	0,02
			HM2	31 522,00	548,94	820,67	66,75	1,77
			(HM2-HC)	449,00	45,58	14,00	4,26	1,32
			(HM2-HC) (%)	1,44	9,06	1,74	6,81	-
		4	HC	22 435,00	503,56	804,63	62,56	0,51
			HM1	22 435,00	503,56	804,63	62,56	0,02
			HM2	25 558,00	525,16	836,18	62,72	7,15
			(HM2-HC)	3 123,00	21,60	31,55	0,16	6,64
			(HM2-HC) (%)	13,92	4,29	3,92	0,26	-
		5	HC	23 882,00	522,26	818,96	63,63	0,48
			HM1	23 882,00	522,26	818,96	63,63	0,02
			HM2	26 794,00	516,10	828,81	62,10	6,20
			(HM2-HC)	2 912,00	-6,16	9,85	-1,53	5,73
			(HM2-HC) (%)	12,19	-1,18	1,20	-2,41	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₄	0,5	1	HC	25 530,00	518,92	810,12	63,93	0,46
			HM1	25 530,00	518,92	810,12	63,93	0,00
			HM2	30 120,00	540,12	827,22	65,42	3,80
			(HM2-HC)	4 590,00	21,20	17,10	1,49	3,34
			(HM2-HC) (%)	17,98	4,09	2,11	2,33	-
		2	HC	30 897,00	498,61	807,66	62,44	0,48
			HM1	30 897,00	498,61	807,66	62,44	0,00
			HM2	34 840,00	527,44	833,30	63,50	7,54
			(HM2-HC)	3 943,00	28,83	25,64	1,06	7,05
			(HM2-HC) (%)	12,76	5,78	3,17	1,70	-
		3	HC	31 245,00	518,47	818,38	63,60	0,48
			HM1	31 245,00	518,47	818,38	63,60	0,03
			HM2	33 475,00	530,99	831,04	64,13	5,03
			(HM2-HC)	2 230,00	12,52	12,66	0,53	4,55
			(HM2-HC) (%)	7,14	2,41	1,55	0,84	-
		4	HC	23 247,00	542,48	819,90	66,14	0,33
			HM1	23 247,00	542,48	819,90	66,14	0,00
			HM2	27 153,00	521,70	828,12	63,42	4,54
			(HM2-HC)	3 906,00	-20,78	8,22	-2,72	4,21
			(HM2-HC) (%)	16,80	-3,83	1,00	-4,12	-
		5	HC	25 043,00	520,60	812,69	64,09	0,57
			HM1	25 043,00	520,60	812,69	64,09	0,02
			HM2	28 398,00	522,12	821,27	63,69	8,31
			(HM2-HC)	3 355,00	1,52	8,58	-0,41	7,74
			(HM2-HC) (%)	13,40	0,29	1,06	-0,63	-

Z	α	Iteração	Heurística	Criticidade	Tempo Fiscalização (minutos)	Tempo Total (minutos)	% Tempo Fiscalização	Tempo Execução (segundos)
Z ₄	0,8	1	HC	19 985,00	475,58	780,81	60,85	0,48
			HM1	19 985,00	475,58	780,81	60,85	0,00
			HM2	33 405,00	519,07	822,19	63,23	5,93
			(HM2-HC)	13 420,00	43,49	41,38	2,38	5,45
			(HM2-HC) (%)	67,15	9,14	5,30	3,91	-
		2	HC	23 232,00	485,84	807,62	59,73	0,52
			HM1	23 232,00	485,84	807,62	59,73	0,00
			HM2	26 724,00	525,39	829,78	63,17	6,09
			(HM2-HC)	3 492,00	39,55	22,16	3,45	5,57
			(HM2-HC) (%)	15,03	8,14	2,74	5,77	-
		3	HC	30 854,00	498,31	806,47	61,05	0,45
			HM1	30 854,00	498,31	806,47	61,05	0,00
			HM2	31 195,00	521,13	824,41	62,90	5,01
			(HM2-HC)	341,00	22,82	17,94	1,85	4,55
			(HM2-HC) (%)	1,11	4,58	2,22	3,03	-
		4	HC	34 794,00	542,67	813,00	66,90	0,39
			HM1	34 794,00	542,67	813,00	66,90	0,00
			HM2	34 794,00	542,67	813,00	66,90	2,19
			(HM2-HC)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80
			(HM2-HC) (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	-
		5	HC	19 599,00	525,45	803,01	65,49	0,43
			HM1	19 599,00	525,45	803,01	65,49	0,02
			HM2	31 404,00	519,43	821,31	63,60	5,55
			(HM2-HC)	11 805,00	-6,02	18,30	-1,89	5,12
			(HM2-HC) (%)	60,23	-1,15	2,28	-2,89	-

HCGA – Heurística Construtiva *Greedy* Aleatorizada; HM1 – Heurística Melhorativa 1; HM2 – Heurística Melhorativa 2; Z – Subzona.

Anexo H. Soluções Admissíveis para Z_1 Obtidas com HCGA com $\alpha = 0,5$ e HM2

h	Ligação	TD	TF	tijh	t_cmcj	soma_t	Cijh
9	4;12	2,56	5,11	7,67	-	7,67	2899
9	12;17	7,68	22,16	29,84	-	37,51	528
9	17;16	6,14	12,35	18,49	-	56	525
9	17;16	3,07	0	3,07	-	59,07	0
9	16;15	9,05	13,35	22,4	-	81,47	4829
10	15;16	9,14	12,64	21,78	-	103,25	4057
10	16;10	11,78	25,31	37,09	-	140,34	788
11	16;21	5,9	12,54	18,44	-	158,78	728
11	16;17	6,14	12,35	18,49	-	177,27	645
11	16;15	9,05	17,55	26,6	-	203,87	516
12	15;16	9,14	12,64	21,78	-	225,65	4057
12	16;17	-	-	-	6,69	232,34	0
12	17;19	-	-	-			
12	19;22	-	-	-			
TOTAL	-	79,65	146	225,65	6,69	232,34	19572

(a)

h	Ligação	TD	TF	tijh	t_cmcj	soma_t	Cijh
14	4;12	2,56	7,21	9,77	-	9,77	1661
14	12;17	7,68	22,16	29,84	-	39,61	347
14	17;16	6,14	12,35	18,49	-	58,1	190
14	17;12	2,56	0	2,56	-	60,66	0
15	12;4	2,7	8	10,7	-	71,36	464
15	4;3	10,26	18,27	28,53	-	99,89	329
15	3;11	2,59	23,2	25,79	-	125,68	375
16	11;3	2,59	0	2,59	-	128,27	0
16	3;2	5,12	8,83	13,95	-	142,22	204
16	3;2	2,56	0	2,56	-	144,78	0
16	2;10	4,38	9,32	13,7	-	158,48	238
16	2;1	-	-	-	3,6	162,08	0
TOTAL	-	49,14	109,34	158,48	3,6	162,08	3808

(b)

h	Ligação	TD	TF	tijh	t_cmcj	soma_t	Cijh
11	1;2	7,2	18,27	25,47	-	25,47	497
11	1;8	1,36	0	1,36	-	26,83	0
11	8;9	3,26	10,51	13,77	-	40,6	405
11	9;8	3,26	0	3,26	-	43,86	0
11	8;1	1,36	3,71	5,07	-	48,93	199
11	1;2	3,6	0	3,6	-	52,53	0
11	2;10	4,38	9,32	13,7	-	66,23	1253
12	2;3	5,12	8,83	13,95	-	80,18	1020
12	2;1	3,6	0	3,6	-	83,78	0
12	1;8	1,36	0	1,36	-	85,14	0
12	8;9	3,26	0	3,26	-	88,4	0
12	9;8	3,26	0	3,26	-	91,66	0
12	8;1	1,36	0	1,36	-	93,02	0
12	1;8	1,36	0	1,36	-	94,38	0
12	8;14	1,64	0	1,64	-	96,02	0
12	14;10	5,82	13,1	18,92	-	114,94	597
12	14;8	1,64	3,74	5,38	-	120,32	136
13	8;9	3,26	12,61	15,87	-	136,19	1416
13	9;8	3,26	0	3,26	-	139,45	0
13	8;1	1,36	3,71	5,07	-	144,52	133
13	1;2	7,2	14,07	21,27	-	165,79	417
13	1;2	3,6	0	3,6	-	169,39	0
13	2;1	-	-	-	3,6	172,99	0
TOTAL	-	71,52	97,87	169,39	3,6	172,99	6073

(c)

h	Ligação	TD	TF	tijh	t_cmcj	soma_t	Cijh
15	1;2	7,2	14,07	21,27	-	21,27	604
15	1;2	3,6	0	3,6	-	24,87	0
15	2;10	2,19	0	2,19	-	27,06	0
15	10;14	5,82	13,1	18,92	-	45,98	512
15	10;16	11,78	25,31	37,09	-	83,07	446
16	10;2	2,19	0	2,19	-	85,26	0
16	2;10	2,19	0	2,19	-	87,45	0
16	10;14	2,91	0	2,91	-	90,36	0
16	14;8	1,64	3,74	5,38	-	95,74	244
16	8;9	3,26	10,51	13,77	-	109,51	850
16	9;8	3,26	0	3,26	-	112,77	0
16	8;1	1,36	3,71	5,07	-	117,84	436
16	1;8	1,36	0	1,36	-	119,2	0
16	8;14	1,64	0	1,64	-	120,84	0
17	14;10	5,82	11	16,82	-	137,66	549
17	14;15	1,62	0	1,62	-	139,28	0
17	15;16	9,14	12,64	21,78	-	161,06	4057
17	16;18	3,35	17,69	21,04	-	182,1	1570
18	18;16	3,35	0	3,35	-	185,45	0
18	16;17	6,14	12,35	18,49	-	203,94	2245
18	16;15	9,05	17,55	26,6	-	230,54	965
18	15;14	1,62	3,92	5,54	-	236,08	402
18	14;8	-	-	-	3	239,08	0
18	8;1	-	-	-			
TOTAL	-	90,49	145,59	236,08	3	239,08	12880

(d)

Figura H. 1 – Solução admissível para Z_1 obtida com HCGA com $\alpha = 0,5$. Percursos do AFE 1 turno da manhã (a) e turno da tarde (b) e percursos do AFE 2 turno da manhã (c) e turno da tarde (d)

h	Ligação	TD	TF	t _{ijh}	t _{cmcj}	soma_t	Cijh
9	4;12	2,56	5,11	7,67	-	7,67	2899
9	12;17	7,68	22,16	29,84	-	37,51	528
9	17;16	6,14	12,35	18,49	-	56	525
9	17;16	3,07	0	3,07	-	59,07	0
9	16;15	9,05	13,35	22,4	-	81,47	4829
10	15;16	9,14	12,64	21,78	-	103,25	4057
10	16;10	11,78	25,31	37,09	-	140,34	788
11	16;21	5,9	12,54	18,44	-	158,78	728
11	16;17	6,14	12,35	18,49	-	177,27	645
11	16;15	9,05	17,55	26,6	-	203,87	516
12	15;16	9,14	12,64	21,78	-	225,65	4057
12	16;17	-	-	-	6,69	232,34	0
12	17;19	-	-	-			
12	19;22	-	-	-			
TOTAL	-	79,65	146	225,65	6,69	232,34	19572

(a)

h	Ligação	TD	TF	t _{ijh}	t _{cmcj}	soma_t	Cijh
14	4;12	2,56	7,21	9,77	-	9,77	1661
14	12;17	7,68	22,16	29,84	-	39,61	347
14	17;16	6,14	12,35	18,49	-	58,1	190
14	17;19	1,94	0	1,94	-	60,04	0
15	19;23	0,61	3,52	4,13	-	64,17	442
15	23;19	0,61	0	0,61	-	64,78	0
15	19;17	1,94	4,84	6,78	-	71,56	298
15	17;12	2,56	0	2,56	-	74,12	0
15	12;4	2,7	8	10,7	-	84,82	464
15	4;3	10,26	18,27	28,53	-	113,35	329
15	3;2	5,12	8,83	13,95	-	127,3	231
16	3;2	2,56	0	2,56	-	129,86	0
16	2;10	4,38	9,32	13,7	-	143,56	238
16	2;10	2,19	0	2,19	-	145,75	0
16	10;14	2,91	0	2,91	-	148,66	0
16	14;15	1,62	0	1,62	-	150,28	0
16	15;14	1,62	6,02	7,64	-	157,92	374
16	14;15	1,62	0	1,62	-	159,54	0
16	15;20	2,22	0	2,22	-	161,76	0
16	20;15	2,22	4,62	6,84	-	168,6	304
16	15;14	-	-	-	4,62	173,22	0
16	14;8	-	-	-			
16	8;1	-	-	-			
TOTAL	-	63,46	105,14	168,6	4,62	173,22	4878

(b)

h	Ligação	TD	TF	t _{ijh}	t _{cmcj}	soma_t	Cijh
11	1;2	7,2	18,27	25,47	-	25,47	497
11	1;8	1,36	0	1,36	-	26,83	0
11	8;9	3,26	10,51	13,77	-	40,6	405
11	9;8	3,26	0	3,26	-	43,86	0
11	8;1	1,36	3,71	5,07	-	48,93	199
11	1;2	3,6	0	3,6	-	52,53	0
11	2;10	4,38	9,32	13,7	-	66,23	1253
12	2;3	5,12	8,83	13,95	-	80,18	1020
12	2;10	2,19	0	2,19	-	82,37	0
12	10;16	11,78	27,41	39,19	-	121,56	1322
13	10;2	4,38	9,32	13,7	-	135,26	1148
13	10;2	2,19	0	2,19	-	137,45	0
13	2;1	7,2	14,07	21,27	-	158,72	417
13	2;3	2,56	0	2,56	-	161,28	0
13	3;4	3,42	0	3,42	-	164,7	0
13	4;12	2,56	0	2,56	-	167,26	0
13	12;4	2,7	5,9	8,6	-	175,86	1228
TOTAL	-	68,52	107,34	175,86	-	175,86	7489

(c)

h	Ligação	TD	TF	t _{ijh}	t _{cmcj}	soma_t	Cijh
15	1;2	7,2	14,07	21,27	-	21,27	604
15	1;8	1,36	0	1,36	-	22,63	0
15	8;14	1,64	0	1,64	-	24,27	0
15	14;10	5,82	13,1	18,92	-	43,19	512
15	14;8	1,64	3,74	5,38	-	48,57	154
15	8;14	1,64	0	1,64	-	50,21	0
15	14;15	1,62	0	1,62	-	51,83	0
15	15;16	9,14	12,64	21,78	-	73,61	4057
16	16;17	6,14	14,45	20,59	-	94,2	685
16	16;21	5,9	10,44	16,34	-	110,54	452
16	16;15	9,05	17,55	26,6	-	137,14	451
17	15;16	9,14	12,64	21,78	-	158,92	4057
17	16;10	11,78	25,31	37,09	-	196,01	732
18	16;17	6,14	12,35	18,49	-	214,5	2245
18	16;21	5,9	10,44	16,34	-	230,84	420
18	16;21	2,95	0	2,95	-	233,79	0
18	21;22	3,74	0	3,74	-	237,53	0
TOTAL	-	90,8	146,73	237,53	-	237,53	14369

(d)

Figura H. 2 – Solução admissível para Z_1 e obtida com a HM2. Percursos do AFE 1 turno da manhã (a) e turno da tarde (b) e percursos do AFE 2 turno da manhã (c) e turno da tarde (d)